LE SCIENZE quaderni

75

a cura di Angelo Raffaele Meo

contributi di:

T. Anantharaman, M. Campbell, Feng-hsiung Hsu, D.P. Greenberg, T.G. Gunn, S. Kiesler, B. Littlewood, G.O. Longo, T.W. Malone, A. Nowatzyk, G.D. Rennels, J.F. Rockart, E.H. Shortliffe, L. Sproull, L. Strigini, L. Stringa, V. Tagliasco, L.G. Tesler, W.R. Uttal e M. Weiser.

Autorizzazione Tribunale di Milano N. 93/82 del 27-2-1982 - Spedizione in abbonamento postale - gruppo IV/70 - dicembre 1993 - lire 9500

LE SCIENZE quaderni

Sono disponibili:

Astronomia e astrofisica
QUASAR E BUCHI NERI a cura di Bianca e Francesco Melchiorri (n. 71 - L. 9.500)

Ambiente
ECOSISTEMI a cura di G. Celli (n. 53 - L. 9.000)
IL CLIMA MONDIALE a cura di O. Vittori (n. 54 - L. 9.000)
INQUINAMENTO ATMOSFERICO a cura di V. Ferrara (n. 58 - L. 9.000)

Biologia
LA FOTOBIOLOGIA a cura di G. Forti (n. 46 - L. 8.000)
I PRIMATI a cura di E. Visalberghi (n. 48 - L. 8.000)
L'ORGANIZZAZIONE DELLA CELLULA a cura di V. Bianchi e L. Celotti (n. 50 - L. 8.000)
DIFETTI GENETICI a cura di L. del Senno (n. 51 - L. 8.000)
IL SISTEMA IMMUNITARIO a cura di F. Celada (n. 55 - L. 9.000)
ORMONI: BIOLOGIA E CLINICA a cura di A. Angeli (n. 57 - L. 9.000)
DNA E RNA a cura di V. Sgaramella (n. 62 - L. 9.000)
VIRUS E MALATTIE a cura di M.L. Profeta (n. 65 - L. 9.500)
ESTINZIONE E SOPRAVVIVENZA a cura di P. Omodeo (n. 68 - L. 9.500)
LE NEUROSCIENZE a cura di P. Strata (n. 69 - L. 9.500)
ALIMENTAZIONE E SALUTE a cura di A. Fidanza (n. 72 - L. 9.500)
BIOTECNOLOGIE a cura di G. Grandi e M.R. Spalla (n. 74 - L. 9.500)

Chimica, fisica e matematica
POLIMERI a cura di M. Farina (n. 52 - L. 9.000)
LA SCIENZA DEI CALCOLATORI a cura di D. Mundici (n. 56 - L. 9.000)
LOGICA a cura di C. Mangione (n. 60 - L. 9.000)
LASER E FOTONICA a cura di O. Svelto (n. 63 - L. 9.000)
LA MATEMATICA DELLA COMPLESSITÀ a cura di F. Luccio e L. Pagli (n. 67 - L. 9.500)
IL MONDO DEI QUANTI a cura di L. Lanz (n. 70 - L. 9.500)

Scienze della Terra
IL PIANETA TERRA a cura di D. Fuà e A. Sutera (n. 47 - L. 8.000)
IL RISCHIO SISMICO a cura di E. Boschi (n. 59 - L. 9.000)
L'EVOLUZIONE DEI CONTINENTI a cura di F. Ippolito (n. 64 - L. 9.500)

Scienze umane
ANSIA E DEPRESSIONE a cura di V. Andreoli (n. 61 - L. 9.000)
MENTE E MACCHINA a cura di G. Lolli (n. 66 - L. 9.500)
L'EVOLUZIONE DELL'UOMO a cura di F. Fedele (n. 73 - L. 9.500)

I quaderni sopra elencati sono ancora in vendite nelle librerie. Possono anche essere richiesti direttamente all'editore utilizzando la cartolina di ordinazione inserita in questo numero. L'invio verrà effettuato solo ad avvenuto pagamento con assegno o versamento sul c.c.p. numero 267278 intestato a LE SCIENZE S.p.A.

numero 75 dicembre 1993

LE SCIENZE quaderni

lire 9500

LA CULTURA DEL CALCOLATORE

Un periodico LE SCIENZE S.p.A.
realizzato dalla redazione
della rivista «Le Scienze»
(sei numeri all'anno)

Consulenza scientifica
Felice Ippolito

Coordinamento editoriale
Gianbruno Guerrerio

Collaboratori
Giorgio Bonanomi (*progetto grafico*)
Carlo Marcandalli
Barbara Alessia Bernardelli (*disegni originali*)

Fotocomposizione
Fotocompograf
via Anguissola 2/A
20100 Milano

Uffici:
Piazza della Repubblica, 8 - 20121 Milano
Telefoni: 29001753 R.A.

Abbonamento annuale L. 45.000

Direttore responsabile
Carlo Caracciolo
Registrazione del Tribunale di Milano
n. 93/82 del 27-2-1982

Distribuzione in Italia:
per le edicole
SO.DI.P. "Angelo Patuzzi" S.p.A.
via Bettola, 18
20092 Cinisello Balsamo
per le librerie
La Nuova Italia Editrice S.p.A.
via Ernesto Codignola
50018 Casellina di Scandicci (FI)

Stampa e legatoria
Seregni S.p.A.
via Puecher, 2
Paderno Dugnano (Milano)

Copyright © 1982, 1987, 1990, 1991, 1992, 1993 by LE SCIENZE S.p.A.;

Tutti i diritti sono riservati. Nessuna parte dell'opera può essere riprodotta in qualsiasi forma (per fotocopia, microfilm o altro procedimento) o rielaborata con l'uso di sistemi elettronici o diffusa senza l'autorizzazione scritta dell'editore.

I numeri arretrati possono essere acquistati in libreria o direttamente dall'editore al prezzo di copertina.

Presentazione 2

TECNOLOGIE E RETI INFORMATICHE DEGLI ANNI NOVANTA 4
di Lawrence G. Tesler

I CALCOLATORI DEL XXI SECOLO 12
di Mark Weiser

LA MECCANIZZAZIONE DI PROGETTAZIONE E PRODUZIONE 19
di Thomas G. Gunn

CALCOLATORI E RETI NELL'AZIENDA 33
di Thomas W. Malone e John F. Rockart

ELABORAZIONE AVANZATA PER LA MEDICINA 39
di Glenn D. Rennels ed Edward H. Shortliffe

I TELEOPERATORI 46
di William R. Uttal

I CALCOLATORI E L'ARCHITETTURA 51
di Donald P. Greenberg

IL CALCOLATORE GRANDE MAESTRO DI SCACCHI 56
di Feng-hsiung Hsu, T. Anantharaman, M. Campbell, A. Nowatzyk

IL PROGETTO MAIA 63
di Luigi Stringa

DAL BRACCIO INDUSTRIALE AL ROBOT MOBILE 72
di Vincenzo Tagliasco

CALCOLATORI, RETI E LAVORO 78
di Lee Sproull e Sara Kiesler

LIBERTÀ E SICUREZZA NELL'ERA DELL'INFORMATICA 85
di Giuseppe O. Longo

I RISCHI DEL SOFTWARE 89
di Lorenzo Strigini e Bev Littlewood

Calcolatori e ambiente 94
a cura del Worldwatch Institute

Realtà virtuale 95
di Gianbruno Guerrerio

Letture consigliate 96

Angelo Raffaele Meo è titolare della cattedra di Sistemi per l'elaborazione dell'informazione presso il Politecnico di Torino. Già direttore del progetto finalizzato «Informatica» del CNR dal 1979 al 1985, dal 1970 dirige il Centro di studi per l'elaborazione numerale dei segnali del CNR e, dal 1991, il Consorzio per il supercalcolo del Piemonte.

Copertina di Barbara Alessia Bernardelli.

Presentazione

Le trasformazioni della società determinate dall'avvento del calcolatore sono divenute così numerose e importanti da rendere ardua la definizione di un percorso logico - e quindi la selezione degli articoli - per un quaderno che, come questo, voglia dare un panorama della sua influenza sulla cultura, intesa come «sapere sociale» che guida i comportamenti e le attività di gruppi di persone. Tale difficoltà ha imposto alcune scelte riduttive.

In primo luogo, si è interpretato il tema proposto riportandolo a quello, certamente più ristretto, di calcolatori e applicazioni nella società, limitando a tre gli articoli che trattano problemi importanti come l'organizzazione del lavoro, la professionalità e la formazione, gli atteggiamenti individuali e collettivi, i pericoli della società informatizzata, per quanto rilevanti siano in realtà tali aspetti. Se infatti la prima rivoluzione tecnologico-industriale ha progressivamente spostato occupati dall'agricoltura all'industria, la nuova rivoluzione informatica sta spostando personale dall'industria al terziario e ai servizi. Questa modificazione appare ancora più marcata se si tiene conto del fatto che in ogni società vi sono diverse tipologie di lavoro e che la ripartizione del lavoro globalmente svolto nell'ambito di una comunità nazionale è caratteristica del tipo di società. Nell'antico Egitto, e forse anche nella società agricola del secolo scorso, era prevalente il lavoro manuale ove il compito dell'uomo era sviluppare cavalli-vapore, anzi «uomini-vapore». Nella società industrializzata prevale il lavoro ripetitivo, esemplificato dall'attività svolta alla catena di montaggio. Nella società post-industriale prevale il lavoro intellettuale, a sua volta suddivisibile in lavoro intellettuale ripetitivo e lavoro creativo.

In secondo luogo, essendo amplissimo lo stesso spettro delle applicazioni già attuate, si è deciso di privilegiare le aree applicative più importanti dal punto di vista industriale ed economico, o più significative al fine di comprendere le grandi trasformazioni della società che l'avvento del calcolatore ha determinato. In questa stessa ottica si sono preferite le analisi di sommario alle presentazioni di novità, pur scientificamente e tecnologicamente rilevanti.

Il quaderno può essere pensato come suddiviso in otto capitoli, che descrivono un percorso in tre parti: un racconto delle tecnologie di base, lo scenario delle applicazioni attuali e di quelle attese e sognate, una breve analisi dei problemi della società informatizzata.

Il primo di questi capitoli è dedicato agli straordinari progressi delle tecnologie dell'elaborazione e della trasmissione di dati. La valutazione della rapidità del progresso e dell'importanza delle innovazioni è apparsa necessaria al fine di comprendere le ragioni per le quali applicazioni rivoluzionarie, sognate da anni da imprenditori e ingegneri, sono divenute possibili soltanto nell'ultimo decennio.

Poiché i due articoli selezionati coprivano prevalentemente gli aspetti della grande informatica e delle reti di trasmissione, si sono dedicate alcune «finestre» ai progressi della microinformatica. Miliardi di microcircuiti e microprocessori, del costo di pochi dollari ciascuno, hanno invaso negli ultimi anni non soltanto l'industria informatica in senso stretto, ma tutti i comparti produttivi, dal giocattolo alla bilancia, dalla macchina per scrivere all'aeroplano, trasformando i vecchi prodotti in oggetti nuovi, più capaci, rapidi ed economici. Sono penetrati nelle fabbriche di ogni tipo, annidandosi negli apparati per le fabbricazioni e le movimentazioni, dai bracci dei robot alle macchine utensili, dai sistemi di collaudo ai carrelli automatici. I principali protagonisti dell'ultima rivoluzione industriale meritavano forse qualche finestra in più.

Il secondo capitolo è idealmente *dedicato all'applicazione più antica dell'elaboratore numerico, ossia al calcolo scientifico. Si è scritto «idealmente» perché non si è riportato alcun articolo sull'argomento, ma soltanto le indicazioni in bibliografia di alcuni lavori molto interessanti. I severi vincoli di spazio con cui ci si è dovuti misurare hanno costretto a qualche rinuncia, motivata in parte dalla considerazione che non vi è quaderno di «Le Scienze» che non descriva qualche applicazione significativa dell'informatica al calcolo scientifico.*

Oggi il calcolatore viene usato per prevedere il tempo meteorologico o il percorso di un uragano, per modellare il flusso degli inquinanti nell'atmosfera, per verificare strutture complesse, per guidare astronavi nel loro moto verso un lontano pianeta, per simulare l'impatto di un meteorite sulla Terra, di un'automobile contro un muro o di un iceberg contro una petroliera.

La dedica, sia pure vuota, del secondo capitolo a questo argomento dovrebbe concorrere a ricordare che il calcolatore è divenuto il terzo pilastro su cui si regge la ricerca scientifica, dopo l'investigazione teorica e il lavoro sperimentale.

Il terzo capitolo riguarda l'automazione di fabbrica, forse l'applicazione più importante dal punto di vista della rilevanza economica e sociale. Il sottoscritto è convinto che le rivoluzioni e le continue, rapide trasformazioni degli scenari mondiali a cui abbiamo assistito negli ultimi trent'anni siano state determinate prevalentemente dall'impatto dell'automazione industriale. Essa ha consentito rapidi miglioramenti della qualità dei prodotti e della produttività dei processi, innalzando il tenore di vita dei paesi industrializzati, riducendo le ore giornaliere di attività lavorativa, invertendo la tendenza verso l'urbanizzazione, accrescendo il ruolo della donna nel mondo del lavoro.

L'automazione industriale è stato uno dei fattori più importanti della caduta del socialismo reale. Non si vuole qui mettere in discussione l'importanza della libertà del mercato, ma non si deve neanche dimenticare che la mancanza della libertà e del mercato non ha impedito all'Unione Sovietica di diventare, nei primi anni '60, il secondo paese industrializzato del mondo. Dal giorno in cui il Comitato centrale del PCUS definì l'informatica «scienza capitalistica» il declino economico fu continuo. Più di ogni altra cosa pesò l'incapacità di produrre a basso costo quei prodotti di massa, dall'automobile al televisore, che con i loro volumi costituiscono le voci più significative della produzione globale di un paese.

L'automazione industriale ha aumentato la distanza fra i paesi ricchi e i paesi poveri. Ha infatti privato questi ultimi dell'unica ricchezza di cui disponevano: il lavoro manuale, che permetteva loro la raccolta delle briciole cadute dalla tavola dei ricchi attraverso l'ospitalità alle manifatture straniere o attraverso le rimesse degli emigranti.

Per illustrare il tema è stato scelto un articolo un po' vecchio, che risale al 1982. La scelta è caduta su quel lavoro nonostante i progressi intercorsi di molte tecnologie del settore, in virtù della grande chiarezza con cui sono là esposti i principi dell'automazione di fabbrica. Si tenga comunque presente che se i progressi tecnologici hanno migliorato qualità e produttività delle lavorazioni e delle movimentazioni elementari, poco hanno influito sulle tecniche e sui metodi per la logistica e la gestione globale della fabbrica.

Il quarto capitolo contiene un articolo su calcolatori e reti aziendali e, più in generale, sulle soluzioni tecniche per la ge-

stione di un'azienda. I problemi trattati non sono quelli dell'automazione della fabbricazione, ma quelli, certamente più difficili, della gestione integrata dell'azienda. Lo stesso tipo di problema si presenta nell'integrazione di un'azienda sul mercato e sul tessuto delle altre aziende e, più in generale, nella gestione dei grandi sistemi tecnologici e organizzativi.

Anche il quinto capitolo è rappresentato da un solo articolo, scelto per la sua generalità fra i molti concernenti le applicazioni della matematica alla medicina. Forse, dal punto di vista scientifico o economico, quest'area applicativa non è più importante di altre che sono state qui ignorate, tuttavia non si poteva non porre in evidenza un settore di così grande rilevanza sociale.

Il sesto capitolo, dedicato alle «altre applicazioni» avrebbe potuto essere voluminoso come l'Enciclopedia Treccani. Sono stati invece selezionati unicamente tre lavori, due dei quali relativi ad aree di non grande importanza economico-sociale. Il primo, che descrive le applicazioni del calcolatore all'architettura civile, è stato scelto per aprire una finestra sulle applicazioni della grafica e della multimedialità e sulle opportunità offerte dall'avvento di tali tecnologie. L'altro, che illustra i fondamenti teorici del giocatore automatico di scacchi, è stato selezionato per la stretta connessione con il tema dell'intelligenza artificiale discusso nel capitolo successivo e, infine, per la rilevanza sociale del «gioco».

«Narra infatti una leggenda che quando il gioco fu presentato per la prima volta a corte, il sultano volle premiare l'oscuro inventore esaudendo ogni suo desiderio. Questi chiese per sé un compenso apparentemente modesto, di avere cioè tanto grano quanto poteva risultare da una semplice addizione: un chicco sulla prima delle 64 caselle, due chicchi sulla seconda, quattro sulla terza e così via... Ma quando il sultano, che aveva in un primo tempo accettato di buon grado, si rese conto che a soddisfare una simile richiesta non sarebbero bastati i granai del suo regno, e forse neppure quelli di tutta la terra, per togliersi dall'imbarazzo stimò opportuno mozzargli la testa. La leggenda sottace il fatto che quel sovrano dovette pagare in seguito un prezzo ben maggiore: egli si appassionò al nuovo gioco fino a smarrire la ragione. L'esosità del mitico inventore, infatti, è pari solo a quella del gioco stesso.» (Da Paolo Mauresing, La variante Luneburg*)*

Il calcolatore scacchista è un formidabile difensivista, attento e paziente. Sconfitto da un giocatore di grande classe e fantasia, non perdona alcun errore dell'avversario. Può giocare ininterrottamente per ore e ore senza dare alcun segno di stanchezza. Soprattutto, non smarrisce la ragione, come avvenne invece all'antico sovrano, poiché non possiede alcuna ragione da smarrire.

Il settimo capitolo è dedicato all'intelligenza artificiale e alla robotica avanzata. L'argomento è già stato l'oggetto centrale di un altro quaderno, Mente e macchina, *a cura di Gabriele Lolli (n. 66, giugno 1992), che contiene una ricca selezione di articoli di grande interesse scientifico e culturale. Qui ci si limiterà a due lavori dedicati alla robotica avanzata, quella che potrebbe diventare, in un futuro difficilmente prevedibile, la più importante delle aree applicative dell'intelligenza artificiale.*

Oggi si costruiscono meravigliosi robot industriali, utilissimi e precisissimi nei lavori fortemente ripetitivi della produzione industriale di massa. Invece, non si sanno costruire robot per spazzare un marciapiede, apparecchiare o sparecchiare una tavola, rifare il letto, cambiare una lampadina, verniciare un edificio e così via. Il successo delle ricerche sulla robotica avanzata che conducesse anche solo alla realizzazione di un efficiente robot domestico aprirebbe le porte a una nuova, drammatica rivoluzione tecnologica, industriale, economica e sociale. Infatti, l'avvento del calcolatore ha liberato l'uomo dal lavoro alla catena e progressivamente, ma molto lentamente, lo libererà anche dal lavoro intellettuale ripetitivo. Non sappiamo se in un futuro lontano il calcolatore sarà in grado di svolgere anche lavoro creativo.

L'avvento dell'intelligenza artificiale porterebbe a una fase di rapidissima crescita del sapere collettivo dell'umanità e dello sviluppo economico, ma esalterebbe ulteriormente le differenze di potere e ricchezza fra paesi e gruppi di individui.

Infine, l'ultimo capitolo è stato dedicato all'impatto delle tecnologie dell'informazione sulla società e ai pericoli della società informatizzata. Dopo un bell'articolo di carattere generale su calcolatori, reti e lavoro vengono discussi, nei due articoli successivi, il tema della libertà e della sicurezza nell'era dell'informatica onnipresente, e i pericoli degli errori di software nelle applicazioni a rischio. Oggi nessuno ci può garantire in assoluto da pericoli come quello che informazioni riservate sul nostro conto diventino di pubblico dominio, o che uno sconosciuto possegga una copia del nostro bancomat e conosca la relativa chiave d'accesso, o che il sistema esperto di una nave da guerra abbatta l'aereo di linea su cui stiamo viaggiando, avendoci scambiato per il nemico. Molti ancora sono gli sforzi che spettano alla ricerca per risolvere problemi di tale portata.

Alcuni titoli segnalati nella bibliografia presentano le meraviglie delle prime realizzazioni della cosiddetta realtà virtuale. *Il quaderno non riporta alcun articolo sull'argomento perché si è preferito concentrarsi sulla realtà di oggi e dell'immediato futuro, mentre la realtà virtuale, con l'eccezione del simulatore di volo e di poche altre applicazioni, appartiene ancora al futuro lontano.*

*Le tecnologie congiunte dell'intelligenza artificiale e della realtà virtuale consentiranno l'attuazione di prodotti come quelli mostrati nell'illustrazione a conclusione del volume, fiori all'occhiello del catalogo 2010 di Italcucce (l'azienda informatica fondata da Moon Meo, cane informatico e imprenditore). Un cellulare olfattico, invisibile in figura perché costituito da una piastrina di quattro millimetri quadrati incollata su un'unghietta, consentirà la commutazione fonica e odorosa con tutti i cani del mondo. Uno scafandro luminoso mostrerà le immagini (e sintetizzerà gli odori per la variante comune della realtà virtuale) di un mondo fantastico, creato da un elaboratore superminiaturizzato e superintelligente. I guantini (*power gloves*) consentiranno di ricevere sensazioni tattili e di interagire con quel mondo fantastico trasmettendogli ordini e impulsi. Ma i cuccioli di Moon, e i cuccioli dei suoi cuccioli saranno più felici di lui?*

Angelo Raffaele Meo

Torino, ottobre 1993

Tecnologie e reti informatiche degli anni novanta

di Lawrence G. Tesler

I calcolatori, già oggi agili strumenti da tavolo, in futuro saranno sempre più strumenti attivi nel creare e nell'acquisire informazione

Il film *Colossus: The Forbin Project*, del 1970, raccontava la storia di un calcolatore che era riuscito a dominare il mondo da una caverna scavata nelle viscere di una montagna, dove uno stuolo di programmatori in camice bianco si dava da fare attorno ad armadi pavesati di luci lampeggianti e di bobine rotanti.

Questo stereotipo cambiò tra il 1977 e il 1982, quando nelle case e negli uffici fecero il loro ingresso i calcolatori personali. Poco dopo anche il cinema rispecchiò questa nuova realtà: per esempio in *Wall Street*, del 1987, compariva una macchina che aveva dimensioni da tavolo e che al posto di luci e bobine aveva un tubo a raggi catodici, una tastiera e un *mouse* (un dispositivo manuale che comanda un puntatore sullo schermo). La confraternita sacerdotale di programmatori era qui sostituita da un solo utente, il direttore di una finanziaria, per il quale il calcolatore era uno strumento e non più una vocazione.

Nei film degli anni novanta i calcolatori saranno dispositivi poco appariscenti. I loro schermi saranno sottili e piatti, avranno microfoni o puntatori a penna invece di tastiere e trasmettitori senza fili invece di modem collegati da cavi. Inoltre cambierà il loro rapporto con l'utente: non più strumenti isolati per accrescere la produttività, bensì collaboratori attivi nell'acquisire, usare e produrre informazioni, e nel facilitare l'interazione tra utenti. Naturalmente queste previsioni e altre che farò in questo articolo riflettono le mie opinioni personali, anche se esse sono ormai condivise dalla maggior parte degli informatici.

È per esempio opinione diffusa che la collaborazione con l'utente possa rendere i calcolatori molto più attivi e che questo risultato si possa ottenere attraverso più di un dispositivo. Potrebbe essere di volta in volta un calcolatore che sta sul palmo di una mano, una base di dati gestita da un grande calcolatore, una macchina da tavolo. L'utente, spostandosi dall'ufficio all'automobile e poi a una riunione, potrebbe chiedere a un agente elettronico le seguenti prestazioni:

– Trovami in quale giorno di febbraio ho registrato una conversazione telefonica con Sam.

– Procurami un appuntamento con un gommista che sia sulla strada che percorro per tornare a casa e che sia aperto dopo le 18.

– Distribuisci questa bozza agli altri membri del gruppo e avvertimi non ap-

I quattro paradigmi dell'informatica

	A LOTTI	DIVISIONE TEMPO	DA TAVOLO	RETI
DECENNIO	1960-1969	1970-1979	1980-1989	1990-1999
TECNOLOGIA	INTEGRAZIONE A MEDIA SCALA	A GRANDE SCALA	A GRANDISSIMA SCALA	A SCALA ULTRAGRANDE
COLLOCAZIONE	STANZA DEL CALCOLATORE	STANZA DEL TERMINALE	TAVOLO	PORTATILE
UTENTI	ESPERTI	SPECIALISTI	SINGOLI	GRUPPI
POSIZIONE DELL'UTENTE	SUDDITANZA	DIPENDENZA	INDIPENDENZA	LIBERTÀ
DATI	ALFANUMERICI	TESTI, VETTORI	CARATTERI, DIAGRAMMI	SCRITTO, PARLATO
OBIETTIVO	CALCOLARE	ACCEDERE	PRESENTARE	COMUNICARE
ATTIVITÀ DELL'UTENTE	PERFORARE E TENTARE (SOTTOPORRE)	RICORDARE E DIGITARE (INTERAGIRE)	VEDERE E INDICARE (PILOTARE)	CHIEDERE E DI (DELEGARE)
OPERAZIONE	ELABORARE	RIVEDERE	IMPAGINARE	ORCHESTRARE
CONNESSIONI	UNITÀ PERIFERICHE	TERMINALI	CALCOLATORI DA TAVOLO	CALCOLATORI PALMARI
APPLICAZIONI	AD HOC	STANDARD	GENERICHE	A COMPONENTI
LINGUAGGI	COBOL, FORTRAN	PL/I, BASIC	PASCAL, C	ORIENTATI ALL'OGGETTO

pena hanno terminato di leggerla.

– Ordina per la mia biblioteca una copia di tutti gli articoli sinora pubblicati sui fullereni.

I programmatori daranno agli agenti una forma d'intelligenza dotandoli di certe capacità di ragionamento. Gli agenti consulteranno le basi di dati e quando si troveranno in difficoltà chiederanno istruzioni all'utente. Somiglieranno abbastanza a un vero assistente: pur non avendo capacità di intuizione o di iniziativa, saranno in grado di riconoscere schemi ricorrenti nel modo di lavorare dell'utente, di esaminare i messaggi in arrivo e di tener nota delle scadenze. Con questo bagaglio di informazioni, spesso gli agenti si accorgeranno di certe necessità dell'utente prima ancora che questi le esprima o addirittura ne sia consapevole. Un calcolatore mobile potrebbe mettersi in contatto con il suo utente la mattina a colazione inviandogli i seguenti messaggi:

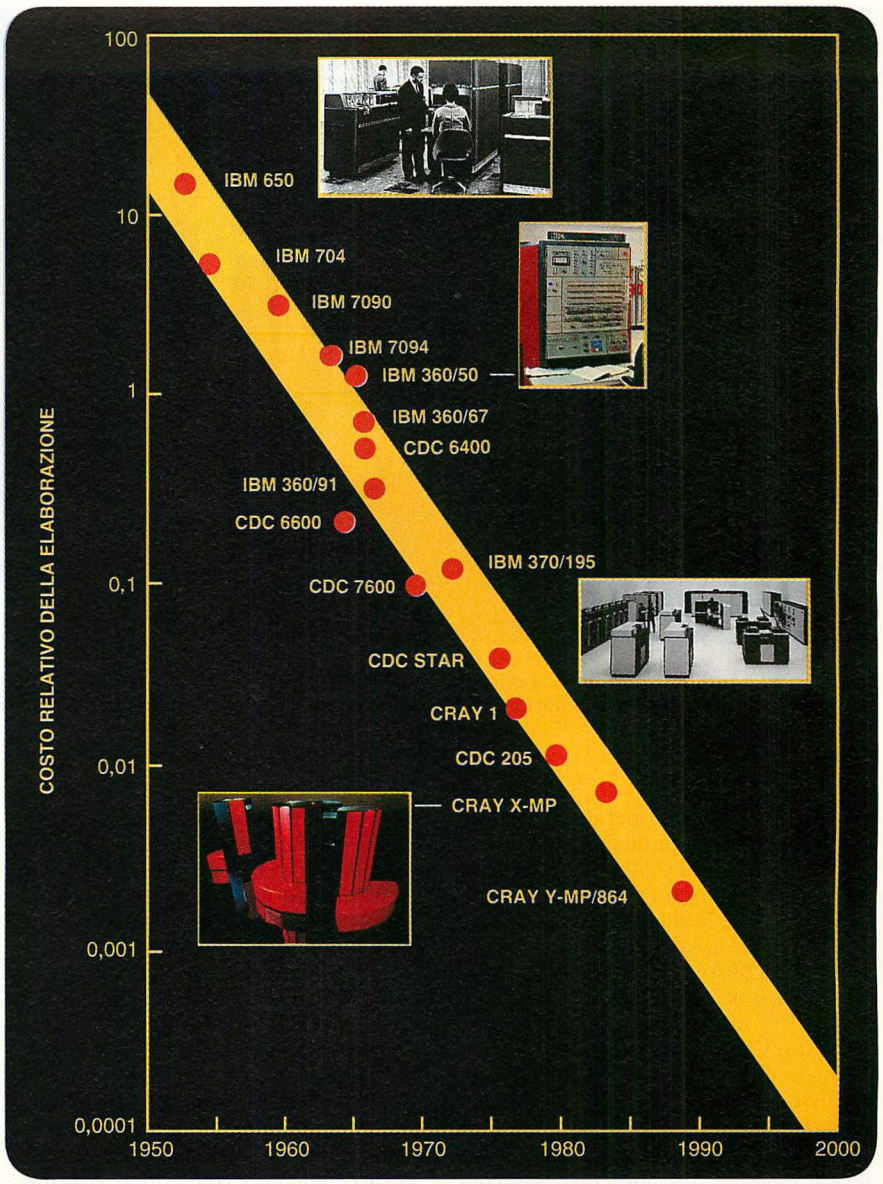
– Mi hai chiesto quando hai registrato l'ultima conversazione telefonica con Sam. È stato il 27 febbraio. Vuoi riascoltarla?

– La settimana scorsa ti sei segnato che la tua macchina ha le gomme un po' sgonfie. Potrei fissarti un appuntamento con il gommista per questa sera.

– Laszlo ha cestinato le ultime quattro bozze che gli hai mandato senza neppure leggerle.

– Hai chiesto gli articoli sui fullereni. Devo ordinare anche gli articoli sugli altri microaggregati del carbonio?

Benché in questo caso gli ordini e le risposte abbiano la forma di frasi stampate, ci sono altre possibilità: potrebbero essere scritti a mano o pronunciati, in forma più o meno esplicita e corretta in varie lingue naturali, o magari in qualche linguaggio informatico più rigido (per esempio l'SQL, un linguaggio costruito per interrogare le basi di dati). Ordini e risposte potrebbero essere specificati sbarrando certe caselle, compilando un modulo o dando risposte succinte a una serie di domande poste dall'agente.



FONTE: Victor Peterson, NASA Ames

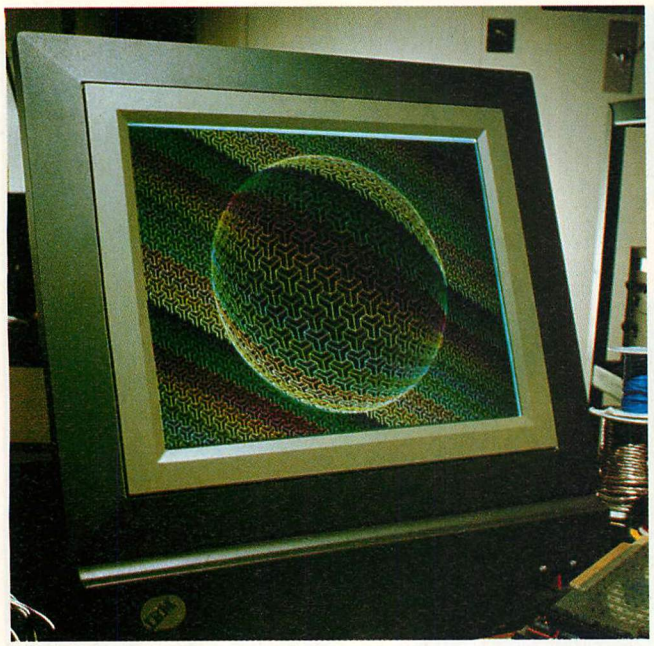
Il costo dell'elaborazione, come mostra questo diagramma dove compaiono i calcolatori più potenti in commercio in ciascun periodo, si è dimezzato ogni tre anni circa.

I cambiamenti di ruolo del calcolatore (da sacro oracolo a strumento personale e ad attivo assistente) sono avvenuti in ondate successive, che possono essere paragonate ai cambiamenti di paradigma, termine con cui il filosofo Thomas S. Kuhn, del Massachusetts Institute of Technology, descrive le rivoluzioni del pensiero scientifico. I paradigmi informatici, resi possibili dai continui progressi di tecnologie e insieme dall'evoluzione del mercato, sembrano presentarsi a intervalli di circa dieci anni.

Il primo paradigma informatico fu varato verso la fine degli anni quaranta e fu introdotto sul mercato negli anni cinquanta; il calcolatore programmabile era allora concepito come uno strumento per i calcoli ingegneristici. Il primo cambiamento si ebbe negli anni sessanta, quando le ditte adottarono il calcolatore come macchina per l'elaborazione dei dati. Il secondo si ebbe negli anni settanta, con la distribuzione dei servizi informatici tra parecchi clienti. Col terzo cambiamento, negli anni ottanta, il calcolatore si trasformò in un efficiente strumento da tavolo per utente singolo. Il quarto è in corso ora è l'annunciano i dispositivi portatili sempre più collegati in rete e le agende elettroniche tascabili: macchine mobili che io chiamo «pericalcolatori». I pericalcolatori sono utili per le loro prestazioni intrinseche, ancorché limitate, e anche perché consentono di accedere al mondo dell'informazione reso disponibile dalle reti.

Ciascun cambiamento di paradigma ha introdotto modifiche fondamentali nella considerazione di cui godono i calcolatori. Negli anni sessanta usare queste macchine era molto costoso e tutto doveva per così dire sottostare alle loro esigenze. Perché la tecnologia fosse conveniente, i dati dovevano essere elaborati in lotti enormi, e solo aziende molto grandi potevano generare lotti del genere. Le ditte eseguivano per esempio un programma sul libro paga per elaborare i cartellini di presenza settimanali e poi caricavano subito nel calcolatore un altro «lavoro», cioè un programma coi dati relativi. I lavori erano codificati su schede perforate o su nastro magnetico e i risultati venivano forniti sotto forma di «listati» su carta perforata piegata a fisarmonica. Se riscontrava un errore nei dati o nel programma, il calcolatore si fermava e restituiva il lavoro errato all'utente per la correzione: a volte c'era da impazzire, perché la soluzione richiedeva ore o addirittura giorni di lavoro.

Negli anni settanta, con l'avvento del *time sharing* (divisione di tempo) l'elaborazione dei dati divenne più accessibile, perché il costo della macchina veniva diviso fra tutti i clienti. Ciò si conseguiva



Gli schermi piatti, come il visore a cristalli liquidi della IBM (*a sinistra*) e il visore a plasma della Fujitsu (*a destra*), sono considerati indispensabili per i calcolatori portatili di forma compatta. Le future macchine dovranno consumare meno energia delle attuali.

adattando il sistema operativo (che coordina le attività interne del calcolatore) in modo che la macchina interagisse di volta in volta con un particolare terminale d'utente. Il calcolatore saltava da un terminale all'altro, e quindi da un compito all'altro, in tempi che andavano da meno di un decimo di secondo a un secondo o più, a seconda dell'impegno richiesto. Usare i calcolatori divenne più facile perché li si poteva raggiungere attraverso un terminale e interrogare in tempo reale. Si poteva cioè procedere verso la soluzione di un problema facendo una domanda e usando la risposta per formulare la domanda successiva.

All'inizio i calcolatori personali fornivano servizi simili alla divisione di tempo, ma erano molto più comodi. I progressi nel campo dei microprocessori consentivano di far stare tutto un calcolatore su un unico chip, cosicché comprare un piccolo calcolatore era più economico che usarne uno di grande capacità in divisione di tempo. Non dipendendo più da costose macchine comuni, gli utenti potevano lavorare a discrezione su problemi che prima richiedevano una programmazione degli orari. L'elaborazione di testi e la realizzazione di grafici divennero attività comunissime.

Di conseguenza, una nuova categoria di utenti fu portata a contatto di programmi applicativi sempre più efficaci, come il foglio elettronico e l'impaginazione, resi accessibili da una potenza di calcolo senza precedenti messa a disposizione di un solo utente. Anche il procedimento dell'interrogazione divenne più facile, perché la fatica di tener nota dei possibili comandi passava dall'uomo alla macchina. Oggi per esempio le varie possibilità sono esposte in menù e in finestre che possono essere esaminati con agio prima di procedere alla scelta.

Milioni di persone furono in grado di permettersi per la prima volta di avvalersi dell'informatica, traendone enormi benefici: non dovevano più ribattere una pagina per aggiungere una frase o aspettare settimane per vedere i loro testi composti e impaginati; non erano più costretti a prendere decisioni sulla base di un paio di proiezioni finanziarie calcolate con gran fatica o a presentare in modo goffo un'idea brillante. All'inizio i nuovi servizi sembravano un lusso, ma ben presto diventarono indispensabili, come era accaduto un secolo prima con la macchina per scrivere.

I vecchi paradigmi non sempre scompaiono del tutto. In questo senso l'evoluzione dell'informatica ricorda quella degli organismi, che spesso sopravvivono in nicchie ecologiche anche se altrove sono stati soppiantati da nuove forme di vita. Per esempio la divisione di tempo è ancora dominante laddove si svolgono transazioni: per esempio nelle agenzie che si occupano di operazioni bancarie, di concessioni di fidi e di prenotazioni aeree. Sono nate anche nuove applicazioni per i calcolatori personali: attraverso un modem gli abbonati al telefono possono avere notizie in linea o effettuare acquisti e operazioni bancarie.

Allo stesso modo, i calcolatori portatili non faranno scomparire quelli da tavolo. Un calcolatore attaccato a una presa ha più potenza di uno a batteria. Lavorando alla scrivania si ha a disposizione una macchina più grande, cioè uno schermo più ampio, una memoria più capace e un ingresso più rapido e preciso attraverso una tastiera completa. Un altro vantaggio che i calcolatori fissi continueranno a presentare è costituito dalla grande quantità di informazioni che possono accettare: i cavi sono in grado di trasportare più dati delle onde radio e dopo i cavi verranno le fibre ottiche, che accentueranno il divario. Questa differenza si farà sentire nelle teleconferenze e in altre applicazioni video che richiedono enormi quantità di dati.

Ciascuna era dell'informatica è caratterizzata dalla velocità di calcolo, dalla gamma di informazioni che si possono elaborare, da come i calcolatori possono essere collegati alla rete, dal software che consente di utilizzare queste reti e dal modo di interazione tra macchine e utenti. La velocità, che è l'elemento più importante, è andata aumentando grazie alla miniaturizzazione.

La riduzione delle dimensioni dei dispositivi elettronici ha fatto aumentare la velocità di trasmissione dei segnali e il numero di operazioni che si possono effettuare nell'unità di tempo facendo contemporaneamente abbassare i costi. Essa ha inoltre consentito di inserire più dispositivi sullo stesso chip incrementando la produzione e abbassando il costo unitario. Questo ha favorito le vendite producendo ulteriori economie di scala. Dal punto di vista del consumatore, la miniaturizzazione ha prodotto apparecchi più pratici e potenti. Inoltre, tutto induce a credere che questa tendenza continuerà.

Trent'anni fa i calcolatori venivano costruiti mettendo faticosamente insieme migliaia di transistori e di condensatori; oggi vengono prodotti in massa con una manciata di chip, su ciascuno dei quali sono integrati milioni di componenti. Negli anni novanta, invece di racchiudere ciascun chip nel suo involucro piatto a forma di centopiedi, l'industria dei semiconduttori conseguirà den-

sità ancora superiori producendo moduli multichip a due e anche a tre dimensioni. I chip impilati formeranno blocchetti grandi come zollette di zucchero.

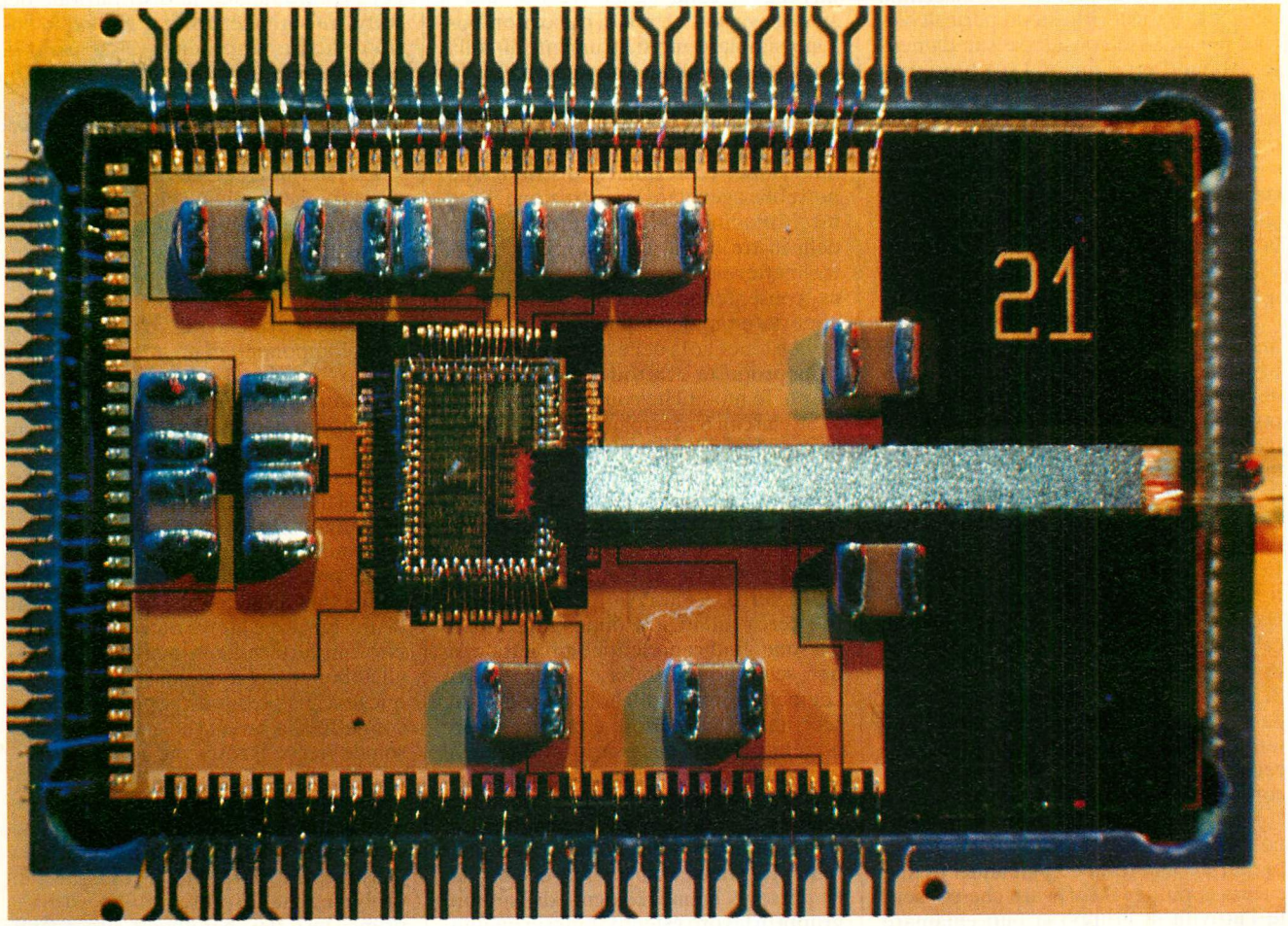
La miniaturizzazione perfeziona anche altri componenti dei sistemi di elaborazione: per esempio, fino a vent'anni fa la memoria era più ingombrante della carta. Per registrare in forma immediatamente accessibile un milione di caratteri a stampa (due fascicoli di questa rivista) occorreva una pila di dischi alta quanto una torta. All'inizio degli anni ottanta, gli stessi dati potevano essere contenuti in un dischetto che entrava in un taschino; negli anni novanta staranno in un dispositivo a semiconduttore non più grande di una carta di credito.

Ciascun nuovo paradigma consente di usare dati di tipo nuovo. I primi sistemi di elaborazione di dati a lotti potevano trattare solo numeri e lettere maiuscole. I sistemi a divisione di tempo consentirono di redigere in modo interattivo documenti e messaggi e anche di sfruttare la grafica vettoriale per la presentazione sullo schermo di disegni al tratto. Coi calcolatori personali è venuta l'eidomatica a scansione, basata su matrici di punti simili ai pixel delle immagini televisive. I calcolatori personali da tavolo consentono già l'uso di sistemi come il video, l'audio, l'animazione e l'eidomatica tridimensionale, che un tempo si potevano affrontare solo con costose stazioni di lavoro. L'imminente generazione dei calcolatori portatili darà ampio spazio al facsimile e al parlato, sistemi utili in particolare a chi si trova lontano dall'ufficio.

Le reti divennero sempre più importanti con l'aumentare del numero dei calcolatori in uso. Ai tempi degli elaboratori a lotti, che erano pochi, non c'era motivo per farli lavorare di concerto. Con l'avvento della divisione di tempo è diventato inconcepibile lavorare senza le reti: linee telefoniche «dedicate» dovevano collegare numerosi terminali a un calcolatore centrale od ospitante (*host*) che poteva essere il grande elaboratore di una ditta o il minicalcolatore di un dipartimento universitario. Il passo successivo fu ovviamente quello di costruire reti più ampie, per esempio tra le varie filiali di una banca, per consentire lo scambio dei dati. Coloro che lavoravano in divisione di tempo avevano in comune una memoria di massa centrale e stampanti ad alta velocità collegate al calcolatore centrale, potendo così scambiarsi messaggi per posta elettronica. I primi terminali erano «stupidi», puri e semplici tramiti per i dati. Le versioni successive cominciarono a incorporare una minima capacità di calcolo, aprendo così la strada ai calcolatori personali.

Nell'era dell'informatica da tavolo, le reti tra calcolatori hanno assunto forme nuove. Le reti locali collegano i calcolatori personali tra loro e alle macchine che lavorano in divisione di tempo, sia grandi calcolatori universali centrali sia macchine specializzate, dette ausiliari (*server*), che assicurano: archivi comuni, stampa di buona qualità e posta elettronica a livello di organizzazione generale. Le reti regionali connetteranno i vari settori di un'impresa, collegando i calcolatori più grandi e gli ausiliari di archivio alle macchine da tavolo. Via via che aumenterà sempre più il numero di calcolatori portatili, prolifereranno i collegamenti senza filo, finché la rete informatica diventerà in pratica onnipresente.

Anche le applicazioni software subiranno trasformazioni quando i calcolatori portatili cominceranno a entrare e a uscire da valigette, borsellini e tasche. In genere i portatili odierni mantengono il modo d'interazione a menù, ma nel



Nexis, chip sperimentale della IBM, trasforma segnali ottici in elettronici a una velocità che consente ai calcolatori di scambiarsi dati in tempo reale a grande distanza. Le reti più avanzate dovranno possedere caratteristiche del genere. Il chip contiene quattro rivelatori integrati di arseniuro di gallio e circuiti di amplificazione e preelaborazione dei segnali in uscita. Si notano i canali in fibra ottica (*al centro*) che trasmettono nel rosso e non nell'infrarosso, utile per minimizzare le perdite d'energia.

prossimo decennio si svilupperanno altri metodi. Per esempio è già comparso un software per la trascrizione, che consente alle macchine portatili di presentare versioni in stampatello di parole scritte a mano e restituzioni precise di schizzi abbozzati. Un software analogo riconosce simboli scritti a mano, ciascuno rappresentante un comando o un'idea complessa. Via via che la tecnologia progredisce trova più ampie applicazioni anche un software per il riconoscimento del parlato che obbedisce a comandi vocali.

Oggi i calcolatori portatili usano per lo più un software scritto per macchine più grandi, ma si allestiscono già pacchetti applicativi per quanti sono lontani dalle loro scrivanie: in questa situazione gli utenti fanno schizzi e prendono appunti, ma non hanno il tempo di mettere in bella le loro minute. Scambiano anche informazioni con clienti e colleghi, prendono contatto con il loro ufficio e pianificano gli appuntamenti e il modo di recarvisi.

I primi pericalcolatori a pieno titolo sono macchine che stanno sul palmo di una mano e sono capaci di espletare queste funzioni: non hanno una grande potenza di calcolo, ma sono adeguati per lavorare nelle situazioni in cui non si possono usare calcolatori con tante funzioni. Si può per esempio predisporre l'itinerario della giornata su una macchina da tavolo e trasferirlo su un pericalcolatore per poterlo consultare rapidamente. Appunti presi quando si è fuori possono essere memorizzati per essere poi riversati su una macchina da tavolo; un'agenda tascabile e una di gruppo possono essere mantenute in sintonia. Queste modeste applicazioni troveranno una clientela abbastanza vasta da giustificare la stesura di un'ampia gamma di software specializzato, e questo nuovo software a sua volta allargherà il mercato.

In effetti nel nuovo paradigma informatico il software si trasformerà più di ogni altra componente: sarà scritto tenendo conto per la prima volta del gruppo oltre che dell'individuo. Questo mutamento riflette l'ampliamento delle reti, che avvicina gli utenti tra loro e al lavoro. Talvolta si dimentica che fino alla fine degli anni settanta per far funzionare un calcolatore ci volevano esperti. Erano come i grandi cuochi dei ristoranti: gli utenti ordinavano e aspettavano che i piatti fossero serviti. L'avvento dei calcolatori personali consentì a persone di qualunque competenza di fare da sé. Si faceva più fatica, come quando ci si fa da mangiare in casa propria, ma i risultati, anche se non sempre di qualità eccellente, erano comunque sotto il pieno controllo dell'utente.

Fra cinque o sei anni lavorare in gruppo mediante una rete sarà facile quanto preparare una festa con gli amici in una cucina comune. Il software che consente l'attività di gruppo si può chiamare *groupware*, mentre l'attività viene anche denominata CSCW (*computer-supported cooperative work*, attività in collaborazione assistita dal calcolatore). La CSCW può essere svolta in uno o più luoghi, nello stesso tempo o in tempi diversi: un incontro in sala riunioni, una teleconferenza, un bollettino elettronico mediante il quale lavoratori di turni diversi possono collaborare o un sistema di posta elettronica mediante il quale un autore e un redattore si scambiano le bozze.

Se le agende dei membri di un'organizzazione sono registrate in un ausiliario di rete, è possibile fissare automaticamente per le riunioni date che vadano bene a tutti grazie a *groupware* come il Meeting Maker, un programma della ON Technology di Cambridge nel Massachusetts. Chi indice l'incontro sceglie una data e una sala libera, propone un ordine del giorno e lo trasmette ai partecipanti. Il software invita le persone, chiede loro se intendono partecipare e prende nota delle osservazioni. L'organizzatore può cambiare facilmente la data, spostando una rappresentazione visiva della riunione da una parte all'altra dell'agenda con un mouse o un puntatore a penna. A questo punto il sistema avverte i partecipanti del cambiamento.

Il Meeting Maker migliora il rendimento di un gruppo, ma altri programmi di groupware vanno più in là, potenziando la collaborazione intellettuale. Per esempio ingegneri di diverse parti del mondo potrebbero lavorare insieme a un progetto come se stessero davanti alla stessa lavagna. Le reti di calcolatori possono simulare molti strumenti di collaborazione esistenti e superare certe loro limitazioni. Un calcolatore potrebbe conservare una registrazione precisa di un dialogo in vista di una futura riorganizzazione, correzione e distribuzione; potrebbe agevolare la costruzione, l'esame, la modifica e la presentazione di modelli in tre o più dimensioni; potrebbe trasmettere minute per posta elettronica, consentendo a tutti i partecipanti di apportare rapide modifiche al testo; potrebbe tener nota delle modifiche e di chi le ha proposte e introdurre automaticamente le modifiche compatibili.

Se ciascun partecipante a una riunione ha un calcolatore e tutti i calcolatori sono collegati in rete, le idee che emergono possono essere registrate ed esposte a tutti in uno spazio comune, o sui singoli calcolatori o su uno schermo murale. Le esperienze fatte al Centro di ricerche della Xerox, a Palo Alto, e in altri centri di ricerca sulla CSCW dimostrano che le persone giudicano le idee proiettate su uno schermo più in base al loro valore che per l'autorità di chi le ha proposte. Un vantaggio ulteriore è che per essere ascoltati non è necessario attendere il proprio turno o chiedere la parola.

Il groupware offrirà maggiori vantaggi quando le comunicazioni senza fili consentiranno agli utenti di accedervi liberamente. Un accesso libero è essenziale: le persone hanno bisogno di formare gruppi di lavoro estemporanei in qualunque stanza, che vi siano o no prese della rete, e soprattutto hanno bisogno di poter accedere alle agende di gruppo anche quando si trovano fuori dei loro uffici. Quando tutto ciò sarà una realtà, si manifesteranno anche altri bisogni. Per esempio una persona che si sposti o che sia in riunione non può fissare a lungo uno schermo o dare istruzioni minuziose, mentre le è facile dare un breve ordine a un agente software infinitamente paziente e obbediente.

In molti casi i programmi di groupware e gli altri programmi per le reti faranno buona o cattiva riuscita a seconda di quanti decimi di secondo impiegheranno per rispondere a un quesito dell'utente. In molti casi programmi scadenti batteranno programmi avanzati perché eseguiranno le istruzioni immediatamente. In particolare ciò accadrà per i servizi attivi, come quelli forniti dagli agenti software, che guidano le decisioni di una persona in tempo reale. Per esempio un automobilista che voglia evitare un ingorgo non può aspettare le istruzioni troppo a lungo.

Ma non basta che il software sia rapido quanto si vuole: dev'essere anche facile da ottenere. Si può già individuare la tendenza del mercato: i calcolatori personali hanno stimolato un mercato di applicazioni generiche ben accette alla massa degli utenti, col risultato che oggi di norma gli editori di software distribuiscono i loro prodotti su dischetti che si possono acquistare nei negozi o ordinare per posta. Quando la distribuzione del software sarà elettronica, chiunque potrà ordinare un prodotto e caricarlo in pochi minuti sul proprio calcolatore. Diminuirà la tentazione di fare copie illecite, come oggi molti fanno più per risparmiare tempo che non denaro.

La distribuzione elettronica del software spingerà anche i venditori a suddividere il software in unità più piccole e più facili da trasmettere. Gli utenti costruiranno le loro applicazioni mettendo insieme elementi di software acquistati separatamente, come oggi si fa con i componenti di un impianto stereofonico. L'avvento di questo software «a componenti» invertirà la tendenza dell'ultimo decennio verso applicazioni software sempre più impegnative, costose e difficili da imparare. Invece di passare dal programma di videoscrittura dell'anno scorso con venti funzioni a quello di quest'anno con quaranta, l'utente potrà scegliere le caratteristiche volute da un catalogo. Chi avrà bisogno di una funzione nuova potrà riceverla subito e in certi casi automaticamente. Per gli abbonati della rete di servizi Prodigy questo è già possibile: appena l'utente si connette alla rete il suo calcolatore personale riceve il software aggiornato.

Affinché le reti onnipresenti possano mantenere tutte le loro promesse, si dovranno eliminare molti ostacoli che possono costituire serie strozzature, un problema che si è presentato spesso nelle prime fasi dei paradigmi precedenti. Benché, per esempio, certi aspetti dell'informatica personale fossero stati previsti con molti anni di anticipo, ci vollero tecnologie come la microunità di elabo-

razione su singolo chip e la DRAM (memoria dinamica ad accesso casuale) come pure molti fattori commerciali perché si avverassero le previsioni per il 1980. Quindi, affinché l'informatica portatile interconnessa diventi la pratica fondamentale degli anni novanta, molte tecnologie dovranno fare progressi in termini di velocità, peso, dimensioni, robustezza, costo e consumo di energia.

Gli schermi piccoli e di basso consumo sono una necessità assoluta per i pericalcolatori. Gli schermi a cristalli liquidi (LCD) sono ormai la norma, per quanto solo ora comincino a raggiungere la qualità dei tubi catodici. Un metodo che sembra poter risolvere il problema e che è stato proposto indipendentemente dai laboratori della RCA e da quelli della Westinghouse è quello di commutare gli elementi del cristallo liquido in modo che essi polarizzino la luce e la inviino sul filtro colorato giusto. Tuttavia gli LCD a colori e la loro illuminazione di fondo a fluorescenza costituiscono un carico molto pesante per la batteria portatile. Alternative che consumino meno energia possono essere offerte da nuove tecnologie che emettono luce direttamente dallo schermo. Un possibile candidato è il visore a emissione di campo, che incorpora migliaia di microscopici catodi.

Il consumo di energia costituisce una delle limitazioni più serie alle prestazioni dei calcolatori elettronici portatili e quindi i dispositivi che presentano il massimo interesse sono quelli che consumano meno. Tra questi ricordiamo: i chip fabbricati secondo il procedimento CMOS (*complementary metal oxide semiconductor*); i sistemi funzionanti a bassa tensione (per esempio 3,3 volt invece dei soliti 5 volt); i circuiti che impiegano pochi chip; le architetture che usano un orologio lento (che dà il ritmo a tutti i componenti, come un direttore d'orchestra).

Le due architetture più promettenti ricorrono a due metodi affatto diversi per ricavare una velocità elevata da una potenza piuttosto bassa. Una è il RISC (*reduced instruction set computer*), in cui molto lavoro viene trasferito dall'hardware al software. Peraltro le architetture RISC attuali sono in genere poco utilizzate nei portatili, dato che sono state progettate per fornire prestazioni di alto livello e non per rendere minimi consumo e dimensioni. Fa eccezione il progetto della ARM, Ltd., di Cambridge in Inghilterra.

L'altro metodo evita di barattare la velocità dell'orologio con il consumo di energia sbarazzandosi dell'orologio stesso. All'inizio queste architetture asincrone, o a flusso di dati, furono progettate come strumenti ausiliari nel campo dell'elaborazione parallela. Ciascuno stadio dell'elaborazione comincia solo quando sono presenti i dati necessari. Ma questa elaborazione «all'ultimo momento» comporta una notevole complessità: è un po' come un'orchestra i cui componenti ricevano le indicazioni l'uno dall'altro anziché da un direttore.

Con l'organizzatore personale le reti stanno nel palmo della mano. Questi dispositivi portatili possono essere consultati direttamente o (*come si vede qui*) per telefono.

Se ciò che interessa è la potenza, si può anche cercare di migliorare le pile. Tra i punti deboli delle pile attuali ricordiamo: l'impossibilità di riutilizzare quelle alcaline, la bassa capacità di quelle al nichel-cadmio e la pesantezza di quelle al piombo. A volte questi inconvenienti possono essere aggirati. Per esempio la miniaturizzazione ha migliorato i condensatori, che possono accumulare l'energia fornita da sorgenti di bassa potenza e restituirla nei momenti di forte assorbimento. Anche il software è stato usato per estrarre automaticamente l'energia residua delle pile al nichel-cadmio prima di ogni ricarica, evitando così una perdita permanente di capacità di accumulazione. Molto promettenti sono anche le nuove pile a base di idruri di nichel e di litio, come pure le celle fotovoltaiche, che vengono già usate nelle calcolatrici. Purtroppo il principio di conservazione dell'energia impedisce che un gruppo di celle solari di dimensioni ragionevoli fornisca una luminosità di fondo abbastanza intensa da superare la luminosità del Sole.

Le tecniche di riconoscimento dello scritto e del parlato sono importanti perché agevolano l'uso dei calcolatori portatili. Si deve tener sempre presente questo fine per non essere tentati di giudicare un sistema solo in base al numero di parole che distingue o alla percentuale di errori che commette. Si è puntato sul riconoscimento della scrittura per introdurre i calcolatori nella vita di chi preferisce non battere su una tastiera. Del resto, ci sono circostanze in cui non si può usare la tastiera, per esempio quando si sta in piedi o si fanno altre cose. In Giappone il riconoscimento della scrittura è ritenuto un fattore importante di vendita, perché il giapponese è costituito da una varietà così grande di simboli che è difficile riprodurli su una tastiera.

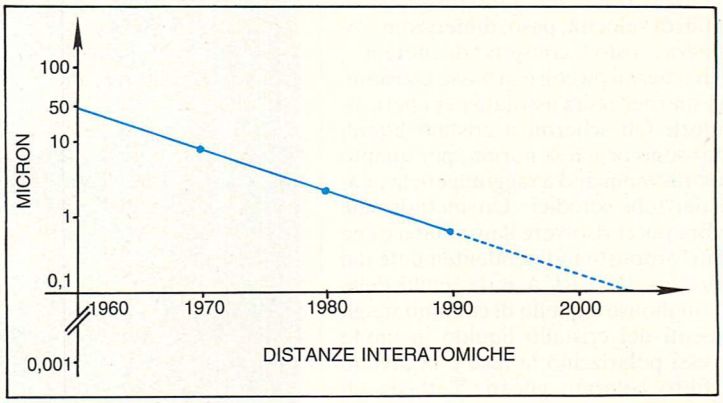
L'esperienza acquisita nel riconoscimento della scrittura è preziosa perché in certa misura può essere trasferita al riconoscimento del parlato. Nelle applicazioni più avanzate, entrambe le tecniche richiedono un'analisi linguistica minuziosa, grazie alla quale il software incrementa le sue possibilità di riconoscere una parola o una frase; entrambe devono affrontare il problema di stabilire dove finisce una parola e comincia la successiva; infine, entrambe devono prevedere una fase di addestramento in modo da adattare le rappresentazioni delle lettere o dei suoni alla grafia e alla pronuncia dell'utente.

Un riconoscimento versatile del parlato richiede una massiccia potenza di elaborazione, ma anche un hardware ridotto può fornire prestazioni utili, anche se limitate. Mentre è difficile programmare un qualsiasi calcolatore per la det-

LE CIFRE DEL PROGRESSO NELLA MICROELETTRONICA

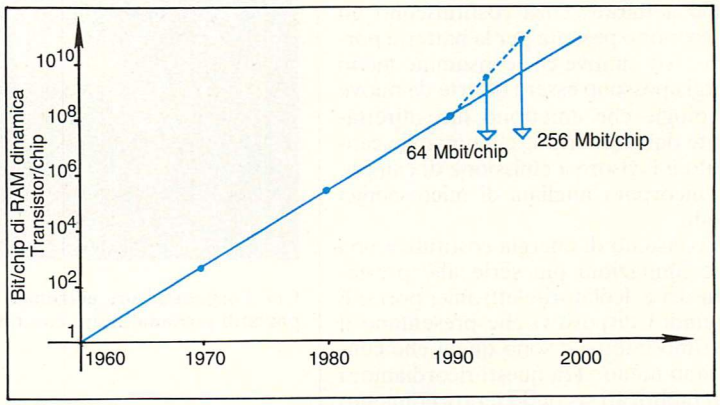
LE DIMENSIONI DEL TRANSISTOR

Ogni 10 anni la larghezza della pista su cui è inciso il transistor è stata ridotta di un fattore 10. Siamo giunti a dimensioni dell'ordine di mezzo micron (millesimo di millimetro), considerata un tempo una misura limite: la luce ha una lunghezza d'onda variabile fra 0,4 e 0, 8 micron, per cui il più sottile raggio di luce sarebbe troppo spesso per disegnare un transistor. Tuttavia, nuove tecniche litografiche basate su radiazioni di piccola lunghezza d'onda, come i raggi X, promettono nuovi miglioramenti, con leggi di progresso ancora più rapide.



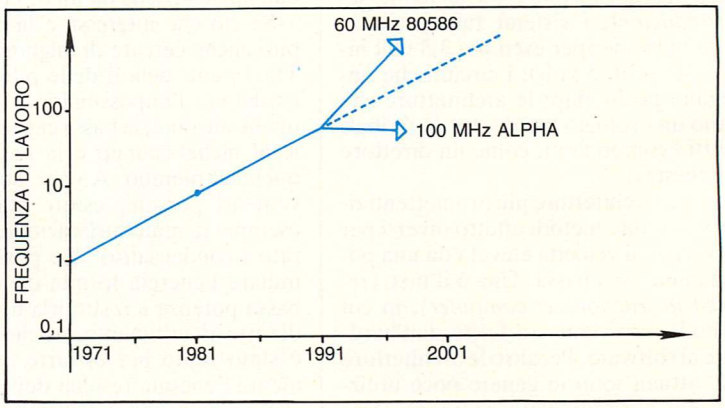
TRANSISTOR PER MICROCIRCUITO

Come conseguenza della riduzione delle dimensioni del transistor di un fattore 10 ogni 10 anni, nello stesso periodo il numero di transistor per microcircuito cresce di un fattore 100. È qui riportato anche il numero di bit per microcircuito di memoria dinamica, che cresce anch'esso di un fattore 100 ogni 10 anni. L'atteso microcircuito di memoria dinamica da 65 milioni di bit per unità è l'oggetto di un'aspra guerra economica fra i grandi produttori di componenti. Anche gli investimenti necesari per affrontare questa guerra sono cresciuti e cresceranno con legge esponenziale.



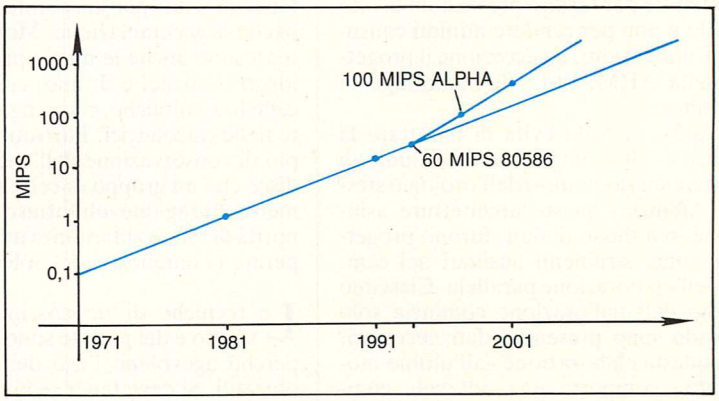
FREQUENZA DI LAVORO

Se le dimensioni del transistor diminuiscono di un fattore 10 ogni 10 anni, nello stesso periodo cresce dello stesso fattore la velocità di funzionamento del microcircuito, come conseguenza della riduzione dei percorsi che i portatori di carica devono descrivere. Anche la frequenza di lavoro del microprocessore cresce nella stessa misura. Il cuore dei microprocessori più avanzati batte oggi a frequenze dell'ordine di 100 milioni di colpi al secondo.



VELOCITÀ DI CALCOLO

La velocità di calcolo del microprocessore cresce per l'effetto combinato della crescita della frequenza di lavoro e della dimensione dei registri. Sono imminenti microprocessori con velocità di elaborazione dell'ordine dei 100 milioni di istruzioni al secondo.



tatura continua senza che esso scambi la fine di una parola con l'inizio della successiva, è facile programmarne anche uno tascabile in modo da fargli distinguere un «sì» da un «no». Alla gran parte degli utenti bastano pochi comandi da pronunciare quando hanno le mani occupate. Si è visto, per esempio, che chi smista la posta rende molto di più se pronuncia i codici di avviamento invece di interrompere il lavoro per riempire un modulo: e in questa applicazione basta che il sistema distingua solo le parole corrispondenti ai primi dieci numeri.

I sistemi di riconoscimento possono identificare un tratto di penna o una consonante continua scomponendoli in un insieme di elementi che vengono confrontati coi campioni contenuti nella memoria del calcolatore. Gli elementi possono essere anche analizzati da reti neuroniche, così chiamate perché imitano quello che si presume sia il funzionamento del cervello. Un calcolatore collega a rete una rappresentazione digitale di un certo numero di neuroni, poi modifica selettivamente il peso assegnato a ciascun collegamento. Un procedimento per tentativi ed errori «addestra» poi il sistema a distinguere tra vari segnali.

Un altro problema tecnico relativo ai pericalcolatori riguarda la capacità del mezzo elettromagnetico. Per impedire che i trasmettitori si assordino a vicenda, le reti di uno stesso edificio avranno i trasmettitori raggruppati in celle grandi una stanza. Celle più grandi richiedono la trasmissione radio, ma le reti locali potrebbero impiegare l'infrarosso, che occupa una parte dello spettro elettromagnetico non soggetta a regolamenti.

La limitata capacità di questo spettro fu messa in luce una decina d'anni fa, quando la moda delle trasmissioni su banda cittadina crollò sotto il proprio peso, perché i radioamatori non riuscivano più a farsi sentire in mezzo alla baraonda. Tuttavia quella crisi sarà niente in confronto a quello che accadrà quando i pericalcolatori cominceranno a riversare nell'etere megabyte e megabyte di dati. Anche l'adozione di un sistema di relè cellulari come quelli usati oggi per i telefoni portatili riuscirà a ritardare la saturazione solo di pochi anni.

In ogni caso i sistemi cellulari saranno necessari perché i calcolatori portatili dovranno essere seguiti nei loro movimenti. Se due utenti lavorando insieme perdono i contatti, la rete dovrà ricollegarli tramite apparecchiature intermedie di instradamento. Ma ci saranno lo stesso momenti in cui i dispositivi mobili perderanno i contatti. Si dovrà quindi progettare un software che consenta la ripresa della comunicazione interrotta.

Le conseguenze che il nuovo paradigma avrà per l'uomo non saranno meno importanti delle trasformazioni tecnologiche. Ogni nuovo paradigma ha influito sul modo in cui gli utenti percepivano il loro rapporto con il calcolatore: ai tempi dell'elaborazione a lotti e della divisione di tempo, molti utenti si sentivano in condizione di sudditanza; i calcolatori da tavolo diedero loro l'indipendenza; i calcolatori portatili interconnessi daranno loro la libertà.

Le reti di calcolatori incideranno dunque non solo sugli affari, ma anche sulla società. L'universalità dei collegamenti solleva problemi di sicurezza e di *privacy* sia personale sia commerciale. Sorge anche il problema della distribuzione dei poteri: se l'ultimo paradigma informatico favorisce le persone istruite a scapito delle altre, allora il divario tra ricchi e poveri potrebbe allargarsi.

Per ragioni di equità sociale e di efficienza economica sarà più importante che mai dare a tutti i cittadini un'istruzione che li metta in grado di utilizzare, senza distinzioni, le risorse dell'informazione. Se le reti apporteranno benefici a tutti, la democrazia potrebbe esserne rinvigorita. Un fenomeno del genere si può osservare nell'Europa orientale, dove pare che i recenti rivoluzionari cambiamenti siano stati agevolati dalla presenza di calcolatori personali, fotocopiatrici e apparecchi per facsimile.

Il calcolatore è insomma molto cambiato dai giorni in cui il cinema lo ritraeva come un inesorabile supercervello che dominava dispoticamente il mondo. Anche la sua immagine presso il grande pubblico è cambiata, sia pure con lieve ritardo. Ma non è lontano il giorno in cui i calcolatori portatili saranno comuni nei film come negli studi cinematografici, dove controlleranno tutto, dalla ventitreesima bozza della sceneggiatura all'indennità di straordinario dell'operatore. A questo punto finzione e realtà si ricongiungeranno e il calcolatore assumerà una nuova identità.

(Da «Le Scienze» n. 279, novembre 1991.)

LAWRENCE G. TESLER *è vicepresidente del settore prodotti avanzati della Apple Computer, Inc. In precedenza ha svolto attività di ricerca presso l'Artificial Intelligence Laboratory della Stanford University e ha lavorato alla Xerox Corporation.*

I calcolatori del XXI secolo

di Mark Weiser

Elementi specializzati di hardware e di software collegati da cavi, radioonde e raggi infrarossi conosceranno una diffusione tale da renderli quasi inosservati

Le tecnologie che incidono più profondamente sulla società sono quelle che non si vedono: s'intrecciano nel tessuto della vita quotidiana fino a confondersi con esso.

Si consideri la scrittura, che è forse la prima tecnologia dell'informazione. La possibilità di rappresentare con simboli la lingua parlata e di conservarla per lunghi periodi liberò l'informazione dai limiti della memoria individuale. Ai nostri giorni l'informazione scritta è contenuta non solo in libri, riviste e giornali, ma anche nei segnali stradali, nei tabelloni pubblicitari, nelle insegne dei negozi e anche nelle scritte murali. La costante presenza di questi prodotti della «tecnologia alfabetica» non richiede un'attenzione esplicita, ma basta un'occhiata e l'informazione da trasmettere è pronta all'uso. È difficile immaginare diversamente la vita moderna.

La tecnologia dell'informazione che affonda le sue radici nell'industria del silicio non è ancora penetrata dappertutto. Pur essendo già più di 50 milioni i calcolatori personali sinora venduti, essi non hanno ancora conquistato appieno la fiducia della gente poiché è possibile accostarsi al calcolatore soltanto tramite un gergo complesso che non ha nulla a che fare con gli scopi specifici per cui è stato acquistato.

La situazione è forse analoga a quella degli antichi scribi, che dovevano conoscere altrettanto bene le tecniche di preparazione dell'inchiostro o della cottura dell'argilla quanto l'arte della scrittura.

L'alone di mistero da cui sono circondati i calcolatori personali non è solo un problema di «interfaccia con l'utente». I miei colleghi del PARC (il Centro di ricerche della Xerox a Palo Alto) e io pensiamo che l'idea stessa di calcolatore «personale» sia fuorviante e che le macchine portatili, i *dynabooks* (libri animati) e i futuri «navigatori della conoscenza» siano solo una tappa intermedia verso la completa attuazione del potenziale della tecnologia informatica. Con le macchine di cui per ora disponiamo non si può pensare che l'informatica riesca a diventare una componente integrale e invisibile della nostra vita. L'obiettivo che ci siamo posti è perciò di arrivare a una nuova concezione dei calcolatori, che tenga conto del mondo in cui viviamo e consenta ai calcolatori di «confondersi con lo sfondo».

La «scomparsa» dei calcolatori è una conseguenza fondamentale non della tecnologia, bensì della psicologia umana. Quando s'impara abbastanza bene una cosa, si cessa di esserne consapevoli: per esempio, quando si guarda un cartello stradale, si capta l'informazione che esso contiene senza compiere l'atto cosciente di leggerlo. L'informatico ed economista Herbert A. Simon, premio Nobel, chiama questo fenomeno «compilazione», il filosofo Michael Polanyi lo chiama «dimensione tacita», lo psicologo J. J. Gibson parla di «invarianti visive»; i filosofi Hans Georg Gadamer e Martin Heidegger lo chiamano rispettivamente «orizzonte» e «a portata di mano»; John Seely Brown del PARC lo chiama «periferia». In sostanza tutti concordano che solo quando le cose scompaiono in questo modo siamo liberi di usarle senza pensare in modo da concentrarci su nuovi obiettivi.

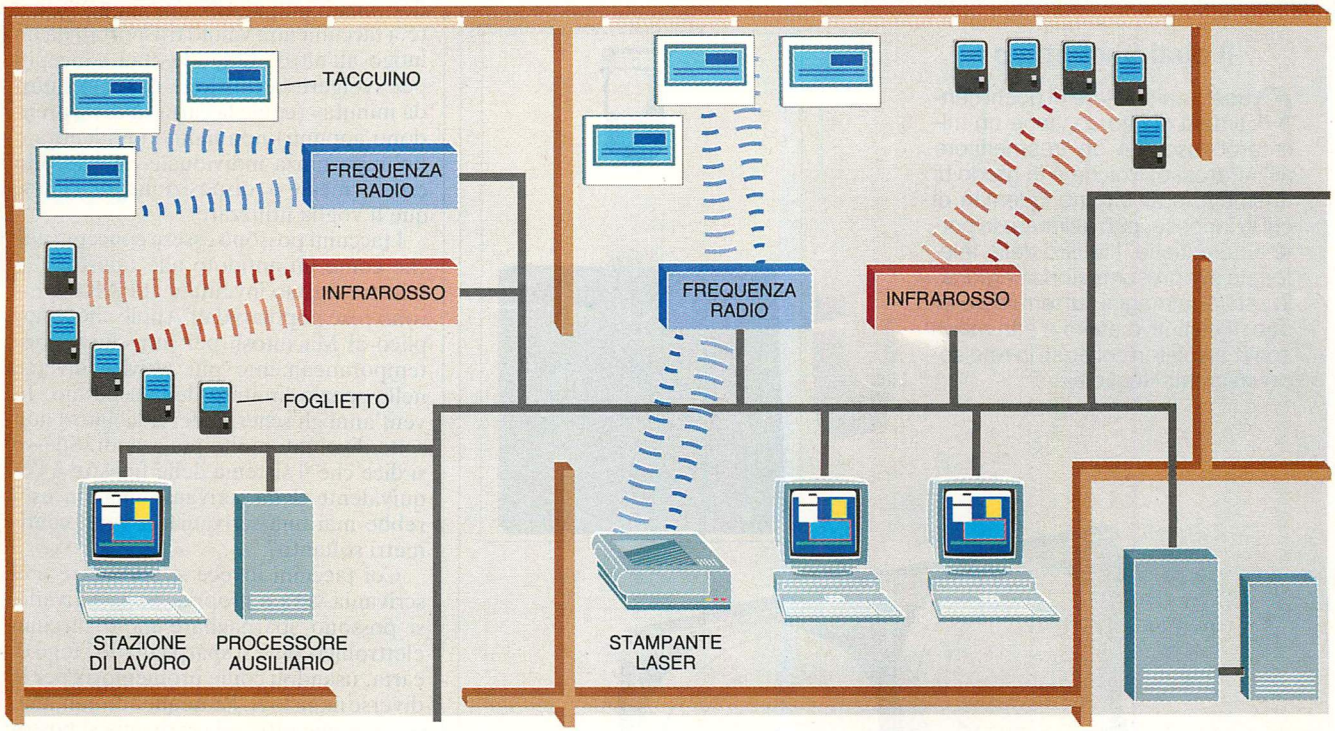
L'idea di integrare i calcolatori in tutti gli aspetti della vita quotidiana contrasta con molte delle attuali tendenze. In questo contesto, «informatica onnipresente» non significa solo disporre di calcolatori che possono essere portati sulla spiaggia, nella giungla o all'aeroporto. Anche il portatile più potente del mondo, con accesso a una rete d'informazione mondiale, farebbe concentrare l'attenzione su un'unica cassettina. È come accade con la scrittura: portarsi dietro un supercalcolatore portatile è come possedere un solo importantissimo libro. Personalizzare questo libro, e anche scrivere milioni di altri libri, non ci avvicina neanche di un passo alla vera potenzialità della scrittura.

Inoltre, benché i calcolatori onnipresenti possano usare l'audio e il video, oltre al testo e ai disegni, non per questo diventano veri «calcolatori multimediali». Allo stato tecnologico attuale, la macchina multimediale fa dello schermo del calcolatore un punto che esige un'attenzione continua anziché consentirgli di confondersi con lo sfondo.

Una tendenza diametralmente opposta si propone di realizzare un mondo fatto di realtà virtuale, che «vive» dentro al calcolatore. In questo mondo gli utenti indossano occhiali speciali che riproducono una scena artificiale; portano guanti o interi abiti che «trasmettono» gesti e movimenti in modo da spostare e maneggiare oggetti virtuali. Per quanto possa essere utile, dato che consente l'esplorazione di dominî altrimenti inaccessibili (l'interno di una cellula, la superficie di un lontano pianeta, la rete di informazioni di una base di dati), la realtà virtuale è solo una mappa, non un territorio: esclude le scrivanie, gli uffici, le persone che non portano gli occhiali e gli abiti speciali, il clima, l'erba, gli alberi, le passeggiate, gli incontri casuali: insomma l'infinita ricchezza dell'universo. La realtà virtuale richiede l'investimento di tecnologie di altissimo livello per simulare la realtà piuttosto che per potenziare il mondo esistente senza farsi notare.

Il contrasto tra il concetto di realtà virtuale e quello di informatica invisibile e onnipresente è così appariscente che alcuni di noi usano la locuzione «virtualità materiata» per indicare l'estrazione dei calcolatori dai loro gusci elettronici. La «virtualità» dei dati che i calcolatori possono leggere è portata nel mondo fisico, con tutti i diversi modi in cui quei dati possono essere modificati, elaborati e analizzati.

Come fanno le tecnologie a «confondersi con lo sfondo»? Un precedente istruttivo è fornito dai motori elettrici.



Reti con fili e senza fili collegano i calcolatori, permettendo agli utenti di condividere dati e programmi. I calcolatori qui raffigurati comprendono terminali ordinari, processori ausiliari, macchine tascabili, dette foglietti, e altre, delle dimensioni di quaderni, dette taccuini. Le reti del futuro dovranno essere in grado di connettere centinaia di dispositivi nella stessa stanza e anche dispositivi (taccuini, stampanti laser, visori di grandi dimensioni ecc.) capaci di essere spostati da un luogo all'altro.

All'inizio del secolo, gli opifici possedevano di solito un unico motore, che faceva funzionare decine o centinaia di macchine diverse grazie a un sistema di alberi e pulegge. Ma l'avvento di motori elettrici, economici, piccoli ed efficienti, consentì dapprima di dotare ciascuna macchina di una propria forza motrice e poi di inserire più motori nella stessa macchina.

Sfogliando il libretto di uso e manutenzione di una moderna automobile, si scoprono, per esempio, 22 motori e 25 solenoidi: essi servono per la messa in moto, per azionare il tergicristalli, per aprire e chiudere i finestrini o le portiere e così via. Con un po' di attenzione si può anche scoprire quando un dato motore viene messo in azione, ma la cosa è irrilevante.

I calcolatori della generazione della virtualità materiata saranno quasi tutti invisibili, sia di fatto sia metaforicamente. Già oggi i calcolatori inseriti negli interruttori, nei termostati, nei forni e negli impianti stereo ci offrono un aiuto prezioso. Queste macchine e altre ancora saranno collegate tra loro mediante una rete ubiquitaria. Da buoni informatici, i miei colleghi e io abbiamo focalizzato la nostra attenzione sui dispositivi che trasmettono e presentano l'informazione in modo più diretto e grazie a questo approccio abbiamo individuato due temi d'importanza fondamentale: la collocazione e la scala. Nella percezione umana poche cose sono più importanti della giustapposizione fisica, quindi i calcolatori onnipresenti dovranno sapere dove si trovano. (I calcolatori odierni, invece, non hanno alcuna idea della propria collocazione e dell'ambiente circostante.) Se un calcolatore sa anche soltanto in che stanza è alloggiato, può adattare in modo significativo il proprio «comportamento» senza fare in alcun modo ricorso all'intelligenza artificiale.

I calcolatori onnipresenti avranno anche dimensioni diverse, a seconda dei compiti che dovranno eseguire. I miei colleghi e io abbiamo costruito quelli che chiamiamo foglietti, taccuini e tabelloni; i primi sono macchine di pochi centimetri che fungono quasi da supporto attivo per messaggi, i secondi, di una trentina di centimetri, sostituiscono i fogli di carta (le pagine di un libro o di una rivista) e gli ultimi sono schermi di un metro circa di lato, che equivalgono a lavagne o ad albi per avvisi.

Quanti foglietti, taccuini, lavagne e tabelloni ci sono di solito in una stanza? Guardiamoci intorno: alla scala dei centimetri troviamo gli appunti fissati al muro, i titoli sul dorso dei libri, le targhette sugli apparecchi di regolazione, i termostati, gli orologi e vari pezzetti di carta. A seconda della stanza si possono trovare oltre cento foglietti, dieci o venti taccuini e uno o due tabelloni o lavagne. Arriviamo così allo scopo che ci siamo prefissi quando parlavamo di virtualità materiata: centinaia di calcolatori in ogni stanza.

A tutta prima immaginare centinaia di calcolatori in una stanza fa una certa impressione, così come un tempo facevano impressione le centinaia di volt che scorrono nei fili elettrici all'interno delle pareti. Ma proprio come i fili dentro le pareti, anche queste centinaia di calcolatori saranno invisibili ai nostri occhi: semplicemente li useremo per svolgere i lavori quotidiani.

I foglietti elettronici sono gli elementi più piccoli della virtualità materiata. Essendo interconnessi, i foglietti incrementeranno l'utilità dei calcolatori di pochi centimetri già esistenti, come la calcolatrice tascabile e l'agenda tascabile. I foglietti elettronici potranno espletare anche funzioni che oggi nessun calcolatore svolge. Per esempio gli informatici del PARC e di altri laboratori di ricerca di tutto il mondo hanno cominciato a lavorare sui distintivi attivi, cioè calcolatori da appendere al risvolto dell'abito come ora si fa con il tesserino di riconoscimento di un impiegato. Inventati dai ricercatori della Olivetti a Cambridge, questi distintivi possono essere riconosciuti dai ricevitori ubicati in tutto l'edificio consentendo di seguire le persone e gli oggetti che li portano.

Nella nostra virtualità materiata sperimentale, le porte si aprono solo a chi porta il distintivo giusto, le stanze salutano per nome chi entra, le telefonate possono essere automaticamente inoltrate al destinatario ovunque si trovi, gli uscieri sanno davvero dove sono le varie persone, i terminali dei calcolatori ricordano le preferenze di chi sta lavorando con loro e le agende degli appuntamenti si scrivono da sé. Le agende automatiche sono una dimostrazione dei vantaggi offerti dal sapere dove si trova-

Il distintivo attivo

Questo calcolatore di pochi centimetri di lato contiene un microprocessore e un trasmettitore all'infrarosso. Poiché è in grado di trasmettere all'intorno l'identità di chi lo indossa, può azionare le porte automatiche, l'inoltro delle telefonate e la presentazione personalizzata di immagini sul terminale video. Il distintivo attivo e altri minuscoli calcolatori collegati in rete sono chiamati «foglietti».

no le persone: le riunioni, per esempio, sono fatte da più persone che trascorrono un certo tempo nella stessa stanza e si può presumere che l'argomento della riunione sia costituito dagli archivi richiamati sullo schermo dai partecipanti. Non occorre alcun uso rivoluzionario dell'intelligenza artificiale: è sufficiente diffondere l'uso dei calcolatori nella vita quotidiana.

Il mio collega Roy Want ha inventato un foglietto elettronico con un piccolo visore che può servire da distintivo attivo e insieme da calendario e da agenda. Serve anche a estendere la portata degli schermi dei calcolatori: per esempio, invece di ridurre una finestra del programma alle dimensioni di una piccola immagine sullo schermo, l'utente potrà trasferire la finestra ridotta sul visore del suo foglietto elettronico. Grazie a questo dispositivo lo schermo sarà libero per le informazioni e gli utenti potranno sistemare i loro progetti assistiti dal calcolatore nella zona intorno ai terminali, più o meno come ora dispongono i loro progetti su carta in pile appoggiate su scrivanie e tavoli. Trasportare un progetto in un altro ufficio è facile: basta raccogliere i foglietti relativi, mentre programmi e archivi possono essere richiamati su qualsiasi terminale.

Un po' più grande del foglietto è il taccuino elettronico, una sorta di incrocio tra un foglio di carta e un calcolatore portatile. Robert Krivacic del PARC ha costruito il prototipo di un taccuino che contiene due microunità di elaborazione, un visore da stazione di lavoro, uno stilo a più tasti e una rete radio con una larghezza di banda sufficiente a trasmettere le comunicazioni di centinaia di dispositivi per persona per stanza.

I taccuini elettronici differiscono dai calcolatori portatili tradizionali sotto un profilo importante: mentre i calcolatori devono accompagnare dovunque l'utente, i taccuini non vanno trasportati da un luogo all'altro. Essendo stati concepiti per svolgere la funzione di «calcolatori da minuta» (come la carta su cui si prendono appunti) non hanno un'identità o un'importanza individuale, ma devono essere messi a disposizione di chiunque li voglia utilizzare.

I taccuini possono essere concepiti anche come un antidoto alle finestre. Le finestre furono inventate al PARC e furono rese popolari dall'Apple che le applicò al Macintosh per introdurre contemporaneamente più attività diverse nello spazio limitato dello schermo. In vent'anni gli schermi dei calcolatori non sono diventati molto più grandi. Spesso si dice che il sistema delle finestre è l'equivalente della scrivania, ma chi userebbe mai una scrivania di venti centimetri soltanto?

Coi taccuini invece si può usare una scrivania vera e propria. Sulla scrivania si possono sparpagliare molti taccuini elettronici come si sparpagliano i fogli di carta, usandoli come promemoria per le diverse mansioni. Proseguendo nell'analogia, come oltre alla scrivania si possono adoperare cassetti, scaffali, tavolini, così l'utente può sparpagliare davanti a sé le diverse parti dei vari compiti della giornata, pianificando i propri programmi nel modo più produttivo. In futuro forse i taccuini elettronici saranno sottili e leggeri come la carta, ma già oggi, rispetto agli schermi dei calcolatori, possono svolgere molte delle funzioni proprie della carta.

I tabelloni elettronici, cioè i visori da un metro, servono a molti scopi: in casa fungono da schermi video e da albi promemoria; in ufficio da bacheche per avvisi e comunicazioni e da lavagne. Il tabellone potrebbe servire anche da scaffale elettronico, dal quale trasferire i testi su un taccuino o su un foglietto. Per il momento, tuttavia, la possibilità di prendere un libro e posarselo comodamente sulle ginocchia resta uno dei molti vantaggi della carta. Obiezioni analoghe si possono sollevare anche contro l'uso di un tabellone elettronico come scrivania: perché la virtualità materiata progredisca, bisognerà che ci abituiamo ad avere sulla scrivania, accanto agli schermi dei calcolatori, i foglietti e i taccuini elettronici.

Prototipi di taccuini costruiti da Richard Bruce e Scott Elrod, del PARC, sono usati in diversi laboratori di ricerca della Xerox. Misurano circa 100 centimetri per 150 e contengono 1024 × 768 pixel in bianco e nero. Per adoperare questi visori, si ricorre a un «gesso» elettronico senza fili, che funziona o a contatto della superficie o a distanza. Alcuni ricercatori, usando se stessi e i colleghi come cavie, fanno riunioni mediate dai mezzi elettronici o intraprendono altre forme di collaborazione intorno a un tabellone animato. Altri usano i tabelloni come banchi di prova per visori hardware di tipo avanzato, per «gessi» di nuova concezione e per un nuovo soft-

ware interattivo.

Per motivi intuitivi e per altri più reconditi, il software che anima un tabellone elettronico e il suo gesso è diverso da quello di una stazione di lavoro. Per andare e venire dal gesso alla tastiera può essere necessario spostarsi di alcuni passi, quindi non è come usare il mouse e la tastiera. Inoltre anche le dimensioni del corpo sono importanti: non tutti riescono a raggiungere la sommità del tabellone e quindi può essere necessario fare scorrere lungo la parte inferiore dello schermo una barra da menù tipo Macintosh.

Abbiamo costruito un discreto numero di tabelloni animati e li abbiamo collocati all'aperto e in normali sale da riunione facendo in modo che, per usarli, non fosse necessario né prenotarsi né firmare registri. Costruendo e usando questi tabelloni, i ricercatori hanno cominciato a capire fino a che punto l'interazione con il calcolatore potenzi informalmente ogni ambiente. I tabelloni animati possono essere usati in comune con profitto nella stessa stanza o da una stanza all'altra. Negli esperimenti suggeriti da Paul Dourish dell'EuroPARC e da Sara Bly e Frank Halasz del PARC, gruppi molto distanti tra loro si raccoglievano intorno a tabelloni che mostravano tutti la stessa immagine e insieme tracciavano disegni e figure. Due tabelloni erano addirittura comuni a gruppi che lavoravano sulle due sponde dell'Atlantico.

I tabelloni animati possono avere anche la funzione di bacheche per affiggere notizie. I testi da leggere e da assimilare sono sempre troppi, quindi Marvin Theimer e David Nichols del PARC hanno costruito il prototipo di un sistema che adegua le informazioni esposte a chi legge. Il loro tabellone richiede poca o nessuna interazione da parte dell'utente, il quale deve solo guardare e portare un distintivo attivo.

I prototipi dei foglietti, dei taccuini e dei tabelloni elettronici rappresentano solo l'inizio dell'informatica onnipresente: la vera potenzialità di questo concetto deriva non dall'uno o dall'altro di quei dispositivi, bensì dalla loro interazione complessiva. Le centinaia di elaboratori e di visori non saranno un'«interfaccia d'utente», come il mouse e le finestre, ma creeranno un ambiente gradevole ed efficiente dove vivere o lavorare.

L'aspetto più positivo dell'impiego diffuso dei foglietti elettronici consisterà nel fatto che possono animare oggetti prima inerti. Possono emettere segnali acustici per aiutarci a cercare documenti, libri o altri oggetti fuori posto. I cassetti dei classificatori possono aprirsi per mostrare la cartella desiderata senza bisogno di ricerche. Collocati nel catalogo di una biblioteca, i foglietti possono costituire mappe attive per rintracciare qualunque libro anche se questo si trova fuori collocazione perché l'ultimo lettore l'ha lasciato sul tavolo.

Durante le conferenze le dimensioni delle scritte sui trasparenti, il volume della voce amplificata e perfino l'intensità dell'illuminazione dell'ambiente potranno essere determinati in base alla volontà degli ascoltatori che in quel momento sono in sala. Le sale di riunione elettroniche di alcune grandi aziende sono già dotate di software per contare i voti all'istante e verificare le maggioranze: i foglietti elettronici estenderanno questa comodità alle aziende minori.

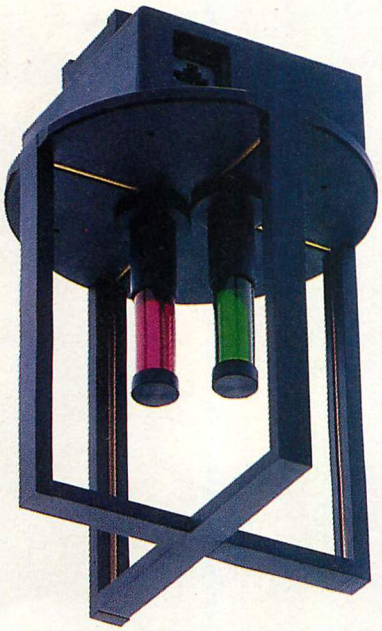
La tecnologia necessaria per lo sviluppo dell'informatica onnipresente è soggetta a una suddivisione in tre settori: calcolatori economici e di piccola potenza comprendenti visori altrettanto convenienti, software per applicazioni onnipresenti e una rete che colleghi il tutto. Le tendenze attuali indicano che la prima esigenza sarà facile da soddisfare, infatti i visori a schermo piatto contenenti 640 × 480 pixel in bianco e nero sono ormai molto comuni. Queste sono le dimensioni normalizzate per i calcolatori personali e vanno più o meno bene anche per la televisione. Via via che si diffonderanno i calcolatori portatili, che

In questo ufficio del Centro di ricerche della Xerox a Palo Alto, i taccuini elettronici da brutta copia ampliano il tradizionale schermo. I prototipi dei taccuini sono collegati ai calcolatori tradizionali; finora sono stati costruiti solo pochissimi modelli senza fili.

stanno sulle ginocchia o sul palmo di una mano, i costi dei visori caleranno e la loro risoluzione e qualità miglioreranno. Alla fine di questo decennio avremo visori da 1000 × 800 pixel a elevato contrasto, dello spessore di alcuni millimetri e del peso di un centinaio di grammi. Una piccola batteria assicurerà parecchi giorni di funzionamento continuo.

Un po' diverso è il discorso per i visori più grandi. Se lo schermo di un calcolatore interattivo deve anche fungere da tabellone elettronico, deve essere visibile tanto dalla distanza di un braccio quanto dal fondo di una sala. Per vederlo da vicino, la densità dei pixel non deve essere inferiore a quella di un normale schermo di calcolatore, circa 30 per centimetro. Ma una densità di questo tipo su un'area di parecchi decimetri di lato comporta la presenza di milioni di pixel, mentre il più grande schermo di calcolatore sinora costruito ha circa un quarto di tale capacità. Visori così grandi saranno probabilmente molto costosi, ma si riuscirà di sicuro a costruirli.

Questo grande schermo avrà bisogno di essere animato da microprocessori molto avanzati. La velocità delle unità centrali di elaborazione, che nel 1986 era di un milione di istruzioni al secondo, continua a raddoppiare ogni anno. Alcuni esperti ritengono che questa crescita vertiginosa della velocità intrinseca dei chip comincerà a rallentare verso il 1994, mentre altre prestazioni, in particolare il consumo e le funzioni ausiliarie, continueranno a migliorare. Allora il visore a schermo piatto da cento grammi potrebbe essere pilotato da una microunità capace di eseguire un miliardo di operazioni al secondo, con una dotazione di 16 megabyte di memoria, di interfacce sonore, video e di rete. Questa unità assorbirebbe in media una frazione quasi trascurabile dell'energia consumata dal visore.



Un ricetrasmettitore radio da soffitto, nei cui bracci a croce sono contenute delle antenne, collega foglietti e altri dispositivi informatici mobili a una rete connessa da fili. I due diodi a emissione luminosa segnalano lo stato dello strumento.

La capacità della memoria principale sarà accresciuta da dispositivi di memoria ausiliari: un'estrapolazione prudenziale della tecnologia odierna lascia prevedere che dischi rigidi asportabili (o chip dotati di memoria non volatile) grandi come una scatola di fiammiferi avranno una capacità individuale di 60 megabyte. Molto diffusi saranno anche dischi più grandi, contenenti parecchi gigabyte di informazioni, mentre le memorie da un terabyte, capaci di contenere migliaia di volumi, saranno piuttosto comuni. Questi enormi depositi non saranno sempre colmi di dati utilizzabili, ma l'abbondanza di spazio consentirà di adottare strategie radicalmente nuove per la gestione delle informazioni. Per esempio, disponendo di uno spazio di un terabyte, diventerà superfluo cancellare i vecchi archivi.

Le unità di elaborazione e i visori potrebbero consentire di realizzare l'informatica onnipresente entro il duemila, mentre gli sviluppi del software e della tecnologia delle reti presentano problemi di più ardua soluzione. Nelle odierne attuazioni dell'«informatica distribuita», i processori ausiliari, le stampanti e gli altri dispositivi collegati in rete lavorano come se fossero collegati direttamente al calcolatore di ciascun utente. Non vengono sfruttate, tuttavia, le capacità dei singoli apparecchi e neppure le informazioni relative all'ubicazione di ciascun singolo dispositivo.

I sistemi operativi dei calcolatori e il software di presentazione a finestre dovranno subire cambiamenti radicali. La struttura degli attuali sistemi operativi, come il DOS e l'Unix, si fonda sull'ipotesi che durante il funzionamento le configurazioni hardware e software del calcolatore non si modifichino sostanzialmente. Questa ipotesi è ragionevole per i calcolatori tradizionali di grandi dimensioni e personali, ma non ha senso nell'informatica distribuita. I foglietti, i taccuini e i tabelloni elettronici possono andare e venire in qualunque momento e in qualunque stanza e sarà certo impossibile fermare tutti i calcolatori di una stanza per installare un nuovo software in ciascuno di essi. (Potrebbe anzi essere impossibile rintracciare tutti i calcolatori presenti nella stanza.)

Una soluzione potrebbe essere offerta dai sistemi operativi a «micronucleo», come quelli inventati da Rick Rashid della Carnegie Mellon University e da A. S. Tanenbaum dell'Università libera di Amsterdam.

Questi sistemi sperimentali contengono solo lo scheletro di un codice fisso, mentre i moduli di software per eseguire particolari funzioni possono essere aggiunti o tolti facilmente. I futuri sistemi operativi basati su questo principio potrebbero ampliarsi e restringersi automaticamente per adeguarsi alle mutevoli necessità dell'informatica onnipresente.

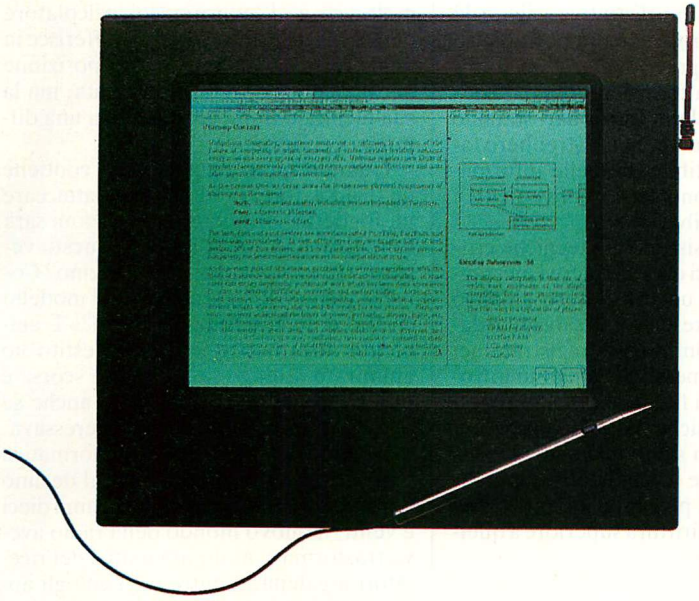
Neppure gli attuali sistemi di presentazione a finestre sono adatti all'informatica onnipresente. Di solito essi presuppongono che un determinato calcolatore presenti tutte le informazioni relative a una data applicazione. Benché per esempio l'X Window System e il Window 3.0 possano gestire più schermi, non se la cavano molto bene con le applicazioni che hanno inizio su uno schermo e si trasferiscono su un altro e si comportano ancora peggio con quelle che passano da un calcolatore all'altro o da una stanza all'altra.

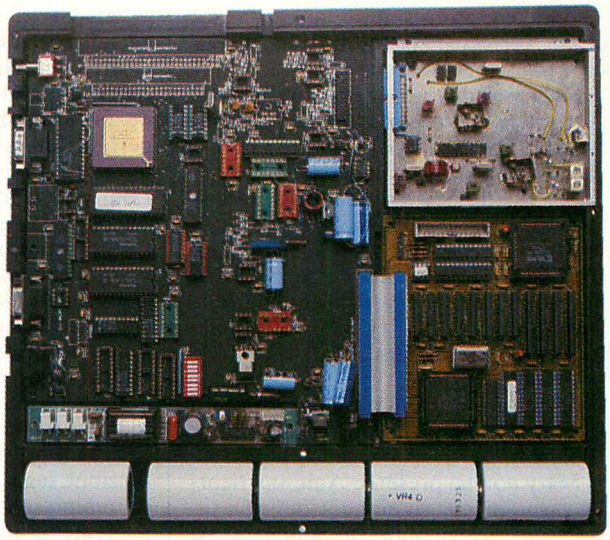
Le soluzioni a questo problema sono ancora in fase embrionale. Certo è che nessun sistema attuale di visualizzazione dà buoni risultati quando deve affrontare tutte le possibili forme d'ingresso e d'uscita richieste dalla virtualità materiata. Per far lavorare insieme senza strappi foglietti, taccuini e tabelloni elettronici sarà necessario modificare i tipi di protocollo con i quali i programmi e le relative finestre comunicano.

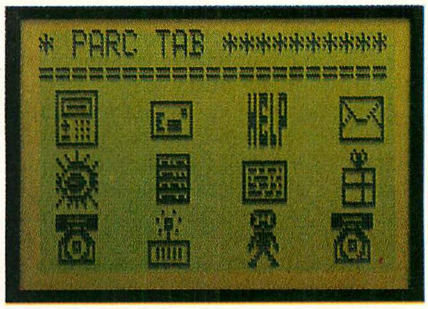
La rete che collegherà l'hardware e il software onnipresenti porrà altri problemi. La velocità di trasmissione delle reti con o senza cavi sta aumentando rapidamente. Già si può accedere a reti con cavi da un gigabit al secondo: sono ancora costose, ma diventeranno via via più economiche. (È raro che una rete da un gigabit impegni tutta la sua larghezza di banda per un solo flusso di dati; di solito trasmette simultaneamente un numero enorme di comunicazioni.) Oggi piccole reti senza cavi basate sui principi dei telefoni digitali cellulari hanno velocità comprese tra due e dieci megabit al secondo su una portata di qualche centinaio di metri. Prima o poi saranno immesse sul mercato reti senza cavi di bassa potenza capaci di trasmettere 250 000 bit al secondo a ciascuna stazione.

Tuttavia il problema di collegare in modo trasparente le reti con cavi e quelle senza non è ancora stato risolto. Benché siano stati proposti alcuni rimedi temporanei, restano da inventare nuovi protocolli di comunicazione che accolgano esplicitamente il concetto di macchina in grado di spostarsi nello spazio fisico. Inoltre il numero di canali previsti in quasi tutti gli schemi di reti senza cavi è ancora molto piccolo rispetto alla portata (da 50 a 100 metri), per cui il numero complessivo di dispositivi mobili è fortemente limitato. Un sistema del genere non ha certo la capacità di sostenere centinaia di macchine in ogni stanza. Nuove reti progettate per una sola stanza e basate sulle tecnologie elettromagnetiche dell'infrarosso o su altre ancora più innovative hanno una capacità di canale sufficiente per l'informatica onnipresente, ma funzionano solo al coperto.

Le tecnologie attuali imporrebbero a un dispositivo mobile di possedere tre diversi collegamenti in rete: uno senza cavi di piccola portata, uno senza cavi di grande portata e uno con cavi ad altissi-







I componenti fondamentali dell'informatica onnipresente sono i foglietti e i taccuini, qui sperimentati nel Centro ricerche della Xerox a Palo Alto. Il taccuino, grande come una pagina (*sopra, vista esterna e interna*), contiene due microunità di elaborazione, quattro milioni di byte di memoria ad accesso casuale, un collegamento radio ad alta velocità, un'interfaccia a penna a elevata risoluzione e un visore in bianco e nero di 1024 × 768 pixel. Usando un normale software per sistemi a finestre, il taccuino può comunicare con gran parte delle stazioni di lavoro. Il foglietto (*a fianco*) è molto più piccolo, circa 7 centimetri per 8, ha tre tasti di comando, un'interfaccia a penna, l'audio e un collegamento all'infrarosso per comunicare all'interno di una stanza. Secondo l'autore, in futuro le case e gli uffici conterranno centinaia di questi minuscoli componenti.

ma velocità. Ancora non è stato inventato un tipo unico di rete che possa espletare tutte e tre le funzioni.

Né esponendo i principi dell'informatica onnipresente né elencando le relative tecnologie si può ricostruire un'immagine realistica di come si vivrebbe in un mondo pieno di invisibili congegni. Fare un'estrapolazione a partire dagli attuali rudimentalissimi frammenti di virtualità materiata è come prevedere la pubblicazione di questa rivista subito dopo l'incisione delle prime tavolette cuneiformi. Nondimeno vale forse la pena di provarci.

Mary si sveglia; nell'aria aleggia l'aroma del caffé. Pochi minuti prima la sveglia, messa sull'avviso dall'irrequietezza che precede il risveglio di Mary, le ha chiesto in un sussurro: «Caffé?» e lei ha farfugliato: «Sì». «Sì» e «No» sono le uniche parole che la sveglia conosce.

Guardando fuori, Mary vede non solo la siepe illuminata dal sole, ma anche le tracce elettroniche degli andirivieni dei vicini nelle prime ore del mattino. Le convenzioni sulla riservatezza non consentono una ripresa video completa, ma i segnatempo e le tracce elettroniche lasciate dai vicini la fanno sentire a suo agio in quella via.

Osservando le finestre delle stanze dei bambini, Mary può sapere che si sono alzati 15 e 20 minuti prima e sono già in cucina. A colazione, Mary legge le notizie: come molti altri, continua a preferire la carta stampata. Sulla pagina dell'economia trova un paragrafo interessante e passa la sua penna elettronica sul nome del quotidiano, sulla data e sul numero di pagina, poi incornicia il paragrafo e lo invia in ufficio.

Per posta elettronica arriva intanto un messaggio dalla ditta che ha costruito l'apriporta automatico del suo garage. Mary aveva smarrito il manuale delle istruzioni e si era rivolta alla ditta, che ora le ha inviato un altro manuale e le indicazioni per ritrovare quello perduto. Stando al messaggio, componendo un numero di codice sull'apriporta, Mary potrà ritrovare il manuale smarrito. In effetti, seguendo un segnale sonoro, Mary trova in garage, dietro alcune casse, il vecchio manuale tutto macchiato d'olio, che reca sulla copertina un talloncino elettronico apposto dal costruttore proprio per evitare richieste di assistenza come la sua.

Andando al lavoro, Mary dà un'occhiata allo specchio «antevisore» per informarsi sul traffico. Scopre che più avanti c'è una coda e allora decide di imboccare la prossima uscita e di bere un caffé nell'attesa che il traffico si normalizzi. Arrivando al lavoro, l'antevisore l'aiuta a trovare subito un posteggio. Mentre s'incammina verso l'edificio, le macchine del suo ufficio si attivano, ma non completano la procedura finché lei non entra nella stanza. Prima però Mary si ferma nell'ufficio di alcuni colleghi per salutarli e scambiare qualche battuta.

Dalla finestra del suo ufficio Mary vede un cielo plumbeo su Silicon Valley e viene informata che c'è un'umidità del 75 per cento e una probabilità del 40 per cento di piovaschi nel pomeriggio. In compenso nella sede della Costa Orientale la mattinata è stata tranquilla. Di solito a quest'ora l'indicatore di attività segnala almeno una riunione convocata d'urgenza.

La spia accanto alla porta che Mary ha programmato il primo giorno di lavoro lampeggia: il caffè è pronto.

Tornando nel suo ufficio, Mary prende un foglietto elettronico e lo «sventola» - elettronicamente parlando, s'intende - a Joe, un suo collega con il quale ha un incarico comune. Per alcune settimane condividono lo stesso ufficio virtuale.

Questa collaborazione può assumere molte forme: in questo caso, ciascuno dei due ha consentito all'altro l'accesso al proprio segnalatore di posizione e al contenuto e all'ubicazione del proprio schermo. Mary ha deciso di tenere sott'occhio una versione in miniatura di tutti i foglietti e taccuini elettronici di Joe, con la giusta tridimensionalità, visualizzandoli sul bordo della scrivania. Benché non riesca a vederne il contenuto, si sente più in contatto col lavoro di Joe se con la coda dell'occhio vede i visori modificarsi e in caso di bisogno le è facile ingrandire l'uno o l'altro.

Un taccuino vuoto sulla scrivania di Mary emette un suono e fa apparire la parola «Joe». Lei lo solleva e lo agita in direzione del suo tabellone animato. Il collega vuole discutere con lei un documento che ora compare sul visore mentre si sente la voce di Joe:

«Ho lavorato per tutta la mattina su questo terzo paragrafo, ma ancora non ha il tono giusto. Ti spiace leggerlo?»

Mary si siede e appena comincia a leggere vuole mettere in evidenza una parola. Prende in mano il foglietto «Joe» e usa lo stilo per incorniciare la parola:

«Credo che sia il termine "onnipresente" ad appesantire il tuo testo. Non è abbastanza comune e gli conferisce un tono piuttosto formale. Possiamo riformulare la frase in modo da eliminarlo?»

«Ci proverò. A proposito, Mary, hai più sentito Ann Hausdorf?»

«No chi è?»

«Ricordi? Era alla riunione della settimana scorsa e mi ha detto che ti avrebbe cercato.»

Mary non ha presente Ann, ma ricorda vagamente la riunione. Comincia subito una ricerca sulle riunioni tenutesi nelle ultime due settimane, selezionando quelle con più di sei persone che non avessero mai partecipato a riunioni con lei e trova quella giusta.

Compaiono i nomi dei partecipanti e vede Ann. Leggendo la sua biografia, Mary vi rintraccia qualche esperienza comune. Le manderà un messaggio per vedere che cosa vuole. È stato un bene che Ann non abbia fornito la propria biografia solo per la durata della riunione, come fanno molti...

Oltre a mostrare alcuni dei modi in cui i calcolatori riescono a entrare nella vita delle persone senza farsi vedere, questo scenario mette in luce alcuni problemi che la virtualità materiata metterà in evidenza. Forse il più importante è quello della riservatezza: centinaia di calcolatori in ogni stanza, capaci di sentire la presenza delle persone e collegati a reti ad alta velocità, sono in grado di istituire forme di controllo di fronte alle quali i totalitarismi odierni sembrerebbero allegre anarchie. Come una stazione di lavoro su una rete locale può essere programmata in modo da intercettare i messaggi destinati ad altri, così un solo foglietto traditore potrebbe registrare tutti gli eventi che accadono nella stanza in cui si trova.

Già oggi, capitando nelle mani sbagliate, gli utilissimi distintivi attivi e le agende che si scrivono da sé potrebbero essere fonte di gravi danni. Non solo i superiori e i subalterni dell'organizzazione, ma anche zelanti funzionari statali e perfino ditte commerciali potrebbero fare un uso discutibile di quelle informazioni che rendono tanto convenienti i calcolatori invisibili.

Per fortuna esistono già tecniche crittografiche capaci di proteggere i messaggi trasmessi da un calcolatore all'altro della rete onnipresente e di salvaguardare le informazioni private registrate nei sistemi interconnessi. Se vengono introdotte nei sistemi fin dalla fase di progetto, queste tecniche possono impedire che i dati privati siano divulgati. Un'attuazione saggia e oculata dell'informatica onnipresente potrebbe garantire una riservatezza addirittura superiore a quella oggi esistente.

Rendendo sempre meno visibili i calcolatori, la virtualità materiata metterà in evidenza le persone che stanno all'altro capo del collegamento informatico, contrastando le perverse tendenze accentratrici che i calcolatori personali odierni hanno introdotto nella vita e nel lavoro. Già oggi molti, imprigionati in uffici senza finestre davanti agli schermi fluorescenti dei loro calcolatori, passano la maggior parte della giornata senza vedere i loro simili. E nella realtà virtuale il mondo esterno e tutti i suoi abitanti in effetti cessano di esistere. I calcolatori onnipresenti, invece, starebbero dentro il nostro mondo e non opporrebbero alcuna barriera alle relazioni personali. Anzi, i collegamenti trasparenti che essi instaurerebbero tra luoghi e tempi diversi potrebbero contribuire ad avvicinare tra loro le varie comunità.

I miei colleghi del PARC e io crediamo che quella che abbiamo chiamato informatica onnipresente diventerà pian piano il modo dominante di accesso ai calcolatori nei prossimi vent'anni. Come il calcolatore personale, l'informatica onnipresente non apporterà nessuna novità essenziale, ma rendendo ogni compito più facile e più rapido, trasformerà molte cose. L'editoria col calcolatore personale, per esempio, non differisce in maniera sostanziale dalla composizione al calcolatore degli anni sessanta, ma la sua facilità d'impiego comporta una differenza enorme.

Quando quasi ogni oggetto contiene un calcolatore o gli si può attaccare un foglietto, ottenere informazioni sarà semplicissimo: «Chi ha fatto questo vestito? Ce ne sono altri in magazzino? Come si chiama il creatore di quel modello che ho visto la settimana scorsa?» L'ambiente informatico sa quale vestito ho ammirato a lungo la settimana scorsa e può trovare il nome del sarto anche se allora l'informazione non m'interessava.

Sotto il profilo sociale, l'informatica onnipresente può comportare il declino dei patiti del calcolatore. Negli anni dieci e venti, il nuovo mondo della radio aveva trasformato molti in fanatici dei ricevitori a galena, mentre oggi che gli apparecchi radio di alta qualità sono onnipresenti, sono ormai rari i patiti della radio. La virtualità materiata riuscirà a far utilizzare i calcolatori anche dai presidenti delle industrie e delle nazioni. Tutti gli strati della società avranno contatto con l'informatica.

Ancora più importante è il fatto che l'informatica onnipresente contribuirà a superare il problema del sovraccarico dell'informazione. L'informazione che possiamo raggiungere con le nostre mani durante una passeggiata in un bosco è ben più ricca di quella che si trova in qualunque sistema informatico, eppure una passeggiata fra gli alberi ci rinfranca, mentre i calcolatori ci stancano. Macchine capaci di adattarsi all'ambiente umano invece di costringere gli uomini a entrare nel loro renderanno l'uso del calcolatore riposante come una passeggiata nel bosco.

(Da «Le Scienze» n. 279, novembre 1991.)

MARK WEISER, *già docente all'Università del Maryland. è responsabile del Computer Science Laboratory presso il Palo Alto Research Center (PARC).*

La meccanizzazione di progettazione e produzione

di Thomas G. Gunn

Sistemi informatici ben organizzati possono consentire incrementi di produttività e migliori servizi ai clienti

La fabbrica è il luogo di lavoro in cui la meccanizzazione sembrerebbe più profondamente radicata e, in effetti, si può far risalire l'origine della fabbrica moderna proprio all'introduzione di macchinari a energia idraulica o a vapore nel XIX secolo, in particolare nell'industria tessile. Oggi ogni fabbrica si affida a una grande varietà di macchine e il lavoro in fabbrica è per lo più immaginato come manovra di macchine. Anche gli sviluppi più recenti del rapporto tra uomo e macchina tendono a essere inquadrati soprattutto nel contesto della produzione industriale e lo stesso studio delle conseguenze sociali della meccanizzazione si è concentrato particolarmente sui suoi effetti sui lavoratori di questo settore. Ironicamente, però, l'industria manifatturiera è risultata uno dei settori dell'economia dove è più difficile sfruttare pienamente il potenziale delle nuove tecnologie.

Le opportunità di una meccanizzazione all'interno della fabbrica sono state ampiamente fraintese: si è concentrata l'attenzione sul processo di produzione vero e proprio e il robot industriale è diventato il simbolo della meccanizzazione totale, come macchina in grado di sostituire integralmente il singolo lavoratore. In realtà il vero e proprio lavoro di fabbricazione e montaggio di un prodotto non è quello dove la meccanizzazione può oggi sortire gli effetti più significativi: quest'attività è responsabile solo del 10-25 per cento dei costi di produzione complessivi e gli addetti costituiscono solo i due terzi delle forze di lavoro totali nell'industria manifatturiera. In questo momento la vera sfida, la principale occasione di miglioramento della produttività, sta nel riuscire a organizzare, pianificare e gestire l'impresa produttiva nel suo complesso, dalla progettazione alla lavorazione, alla distribuzione e all'assistenza. La complessità della fabbrica moderna è tale da incutere un vero timore: in certi stabilimenti è necessario tenere in magazzino migliaia di pezzi differenti per centinaia di prodotti. In effetti la complessità delle procedure spesso è tale che la fabbrica viene ad assomigliare a una strada bloccata da un ingorgo di traffico: non è raro che un singolo componente metallico passi il 95 per cento del tempo occorrente per produrlo fermo lungo la catena in attesa delle varie lavorazioni.

Per questo la produttività del lavoratore dipende in larga misura dal progetto del prodotto e da come sono organizzate le risorse disponibili di manodopera, macchine e materie prime. Senza un intervento su questi fattori non è affatto detto che persino la sostituzione completa degli operai con robot possa avere un effetto significativo sulla quantità o sul costo dei prodotti finiti. Perciò il contributo più importante offerto dalle nuove tecnologie informatiche alla produttività della fabbrica consiste nella loro capacità di collegare la progettazione, l'amministrazione e la produzione tramite una rete di informazioni disponibili sempre e dovunque. E le conseguenze sociali di un tale collegamento riguarderanno molto più le mansioni dei «colletti bianchi» che non quelle dei «colletti blu».

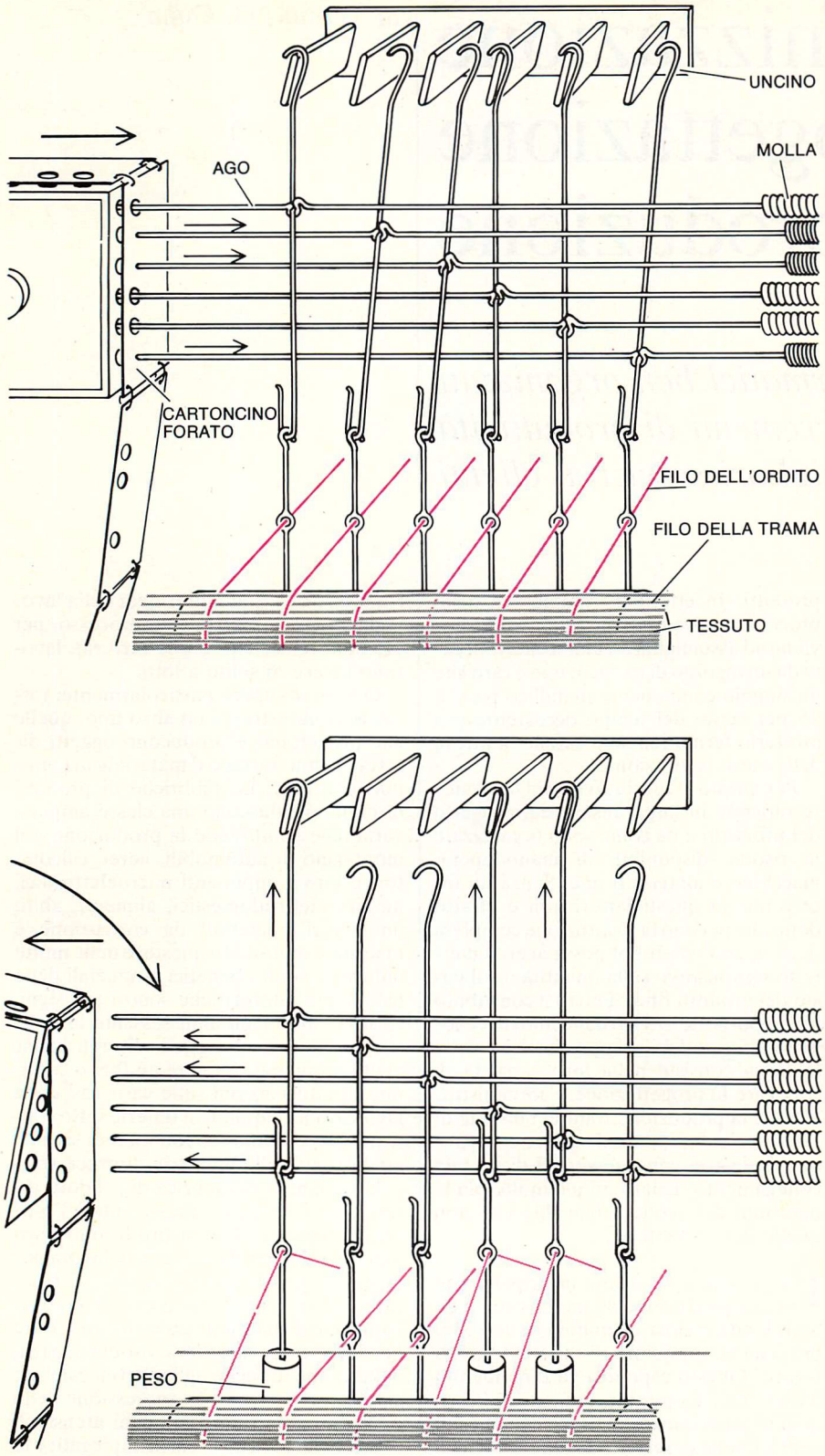
Le ditte che si occupano principalmente della produzione danno lavoro, negli Stati Uniti, a circa 20 milioni di persone, più o meno un quinto di tutte le forze di lavoro. Questo rapporto va diminuendo da 40 anni, sia per il passaggio dell'economia americana dalla produzione di beni a quella di servizi, sia per l'influenza delle tecnologie sull'occupazione.

La produzione industriale abbraccia una vasta gamma di attività e di imprese. In certe industrie si fabbrica un solo prodotto in continuo; esempi familiari possono essere la raffinazione del petrolio, la produzione della carta e la preparazione di molti prodotti chimici. Una caratteristica di questi processi è che sono facilmente controllabili tramite un sistema a retroazione a circolo chiuso: si rilevano le variazioni nella natura del prodotto per regolare l'immissione di materie prime o gli stadi intermedi della lavorazione. Altre industrie di processo, per esempio le acciaierie e le birrerie, lavorano invece di solito a lotti.

Qui mi occuperò particolarmente, tuttavia, di industrie di un altro tipo: quelle che progettano e producono oggetti discreti, e non trattano il materiale in continuo o a lotti. Le fabbriche di prodotti discreti costituiscono una classe ampia e varia, che comprende la produzione e il montaggio di automobili, aerei, calcolatori e loro componenti microelettronici, mobili, elettrodomestici, alimenti, abiti, imballaggi, materiali da costruzione e macchine utensili. In queste, e nelle molte industrie simili i benefici potenziali delle tecnologie informatiche sono i più significativi: solo dagli anni sessanta le industrie produttrici di oggetti discreti hanno avuto mezzi per ottenere un flusso continuo di informazioni sulle varie fasi della lavorazione (e quindi di tenerle sotto controllo con continuità) con metodi simili a quelli usati nelle industrie di processo.

Un esempio di fabbrica di prodotti discreti cui farò spesso riferimento è l'officina meccanica. Qui si producono parti metalliche tramite una serie di lavorazioni, quali il taglio, la perforazione, la fresatura, la tornitura e la levigatura. Uno stesso gruppo di macchine utensili può servire per fabbricare una grande varietà di parti, dalle canne di fucile agli alberi a camme; cambiano solamente la successione delle operazioni effettuate con ogni utensile e la successione degli utensili impiegati: è la stessa versatilità degli strumenti che rende difficile organizzare in maniera efficiente le lavorazioni di tutta la fabbrica. Già da qualche tempo sono comparsi e si sono ampiamente diffusi metodi di programmazione, ovvero di controllo numerico, delle stesse macchine utensili; oggi lo sforzo è concentrato sul coordinamento dell'attività delle varie macchine e sul controllo del flusso del lavoro attraverso l'officina.

Nel corso degli anni gli imprenditori hanno cercato di pianificare, controllare e



Il telaio Jacquard è stata la prima macchina impiegata industrialmente controllata tramite un programma delle operazioni da compiere; il programma era codificato mediante una serie di fori su cartoncini. Il telaio Jacquard è stato il precursore delle moderne macchine utensili a controllo numerico, che eseguono istruzioni codificate su un nastro di carta perforato. In esso la disposizione dei fili veniva fatta corrispondere a quella dei fori con un sistema estremamente ingegnoso. Una fila di aghi collegati meccanicamente ai fili dell'ordito, quelli longitudinali, esamina ogni fila di fori. Quando un ago incontra un foro il filo corrispondente viene sollevato nella fase successiva della tessitura, comparendo sulla faccia superiore del tessuto; se l'ago non incontra un foro il filo rimane al suo posto e passa sul rovescio del tessuto. I cartoncini col programma permettono alla macchina di eseguire automaticamente una complessa successione di operazioni e all'operatore di variare facilmente il disegno modificando la disposizione dei fori. Il meccanismo fu inventato da Joseph-Marie Charles Jacquard nel 1801.

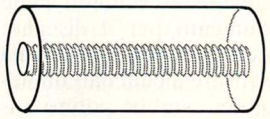
condurre a termine lavorazioni complesse istituendo strutture burocratiche a numerosi livelli di responsabilità; in alcune società americane vi sono addirittura 14 livelli, nella catena di gestione, dal direttore capo al lavoratore del livello più basso. La struttura gerarchica permette all'amministrazione della società di dirigere l'attività della ditta nel suo complesso, ma la distanza che intercorre nell'organizzazione tra il vertice e la base rende difficile tenere sotto controllo le disponibilità di macchinari e manodopera, pianificarne l'utilizzo, stabilire le priorità dei diversi impegni. Oltre a ciò la gerarchia può generare barriere istituzionali tra i reparti e ostacolare il flusso delle informazioni all'interno della ditta, o creare un atteggiamento competitivo tra i reparti che pregiudica il funzionamento complessivo dell'organizzazione.

Alle barriere organizzative che riguardano le comunicazioni si aggiungono spesso barriere materiali: le informazioni, trasmesse oralmente o per iscritto, passando da una persona all'altra sono soggette a ritardi, errori e fraintendimenti. Il tempo necessario per la diffusione di una comunicazione di servizio può impedire un'azione collettiva di una certa rapidità. Per conseguenza alcune grandi organizzazioni produttive hanno reagito intempestivamente alle variazioni del mercato. Un altro risultato degli ostacoli relativi alla comunicazione è la necessità di immagazzinare grandi assortimenti di prodotti, parti e materiali con un considerevole costo in termini di spazio, assicurazione e manipolazione.

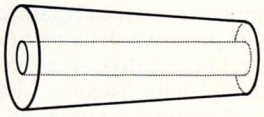
Negli anni cinquanta il carico di pratiche amministrative era diventato troppo gravoso in molti gruppi industriali; per garantire l'esecuzione delle commesse nei tempi stabiliti le ditte iniziarono ad assumere funzionari svincolati dalla gerarchia organizzativa che si preoccupavano di accompagnare i prodotti fino ai cancelli della fabbrica.

Le industrie entrarono a contatto con il calcolatore nei primi anni sessanta; le prime applicazioni si ebbero nella registrazione delle normali operazioni finanziarie, ma gradualmente l'uso dei calcolatori fu esteso ad altri compiti, come il controllo degli inventari, la pianificazione della produzione e il trasferimento di un componente da un processo all'altro, attraverso lo stabilimento. Via via che il numero delle applicazioni cresceva e i diversi reparti adattavano i calcolatori alle loro esigenze, divenne chiaro che i vantaggi della nuova tecnologia si sarebbero potuti moltiplicare collegando certi reparti o certe funzioni.

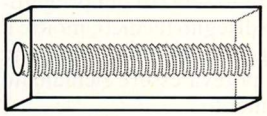
La prima funzione svolta da un calcolatore direttamente legata alle attività produttive non riguardava il processo produttivo vero e proprio, ma la progettazione. Verso la metà degli anni sessanta alcuni ingegneri della General Motors Corporation iniziarono a collaborare con specialisti di programmazione della International Business Machines Corporation per sviluppare un sistema per la pro-



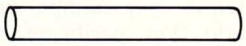
A SEZIONE CIRCOLARE
SQUADRATO
PERFORATO, ALESATO,
FILETTATO
± 0,001 POLLICI
TITANIO
0,11 - 0,5 ORE



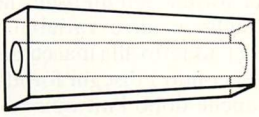
A SEZIONE CIRCOLARE
SVASATO
FORATO, MOLATO
± 0,01 POLLICI
ACCIAIO
0,011 - 0,1 ORE



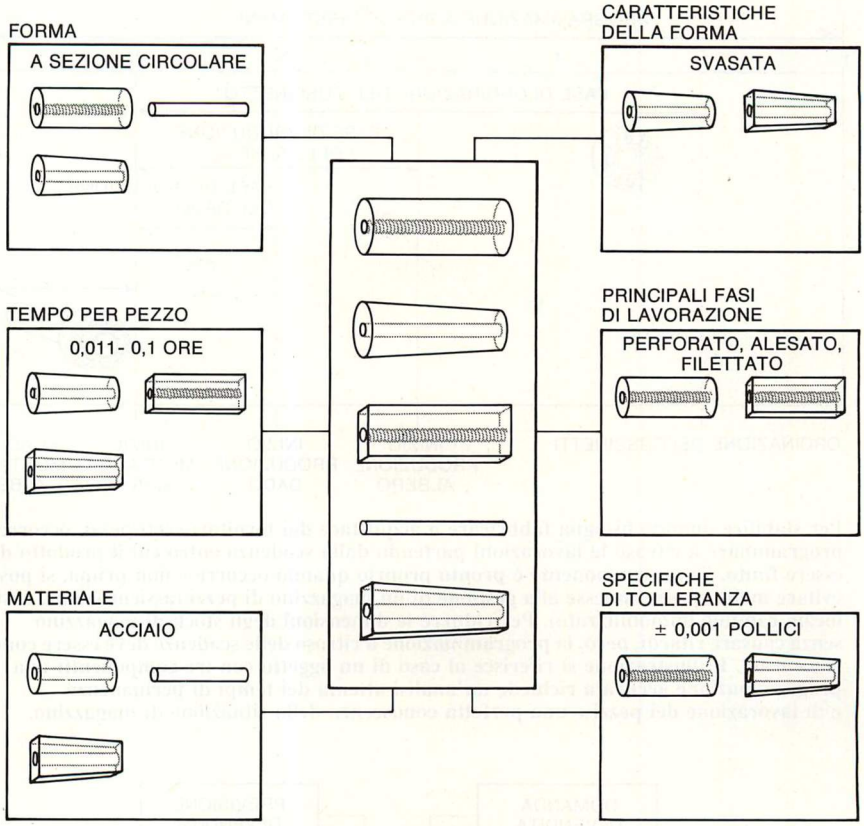
A SEZIONE
RETTANGOLARE
SQUADRATO
PERFORATO, ALESATO,
FILETTATO
± 0,01 POLLICI
TITANIO
0,011 - 0,1 ORE



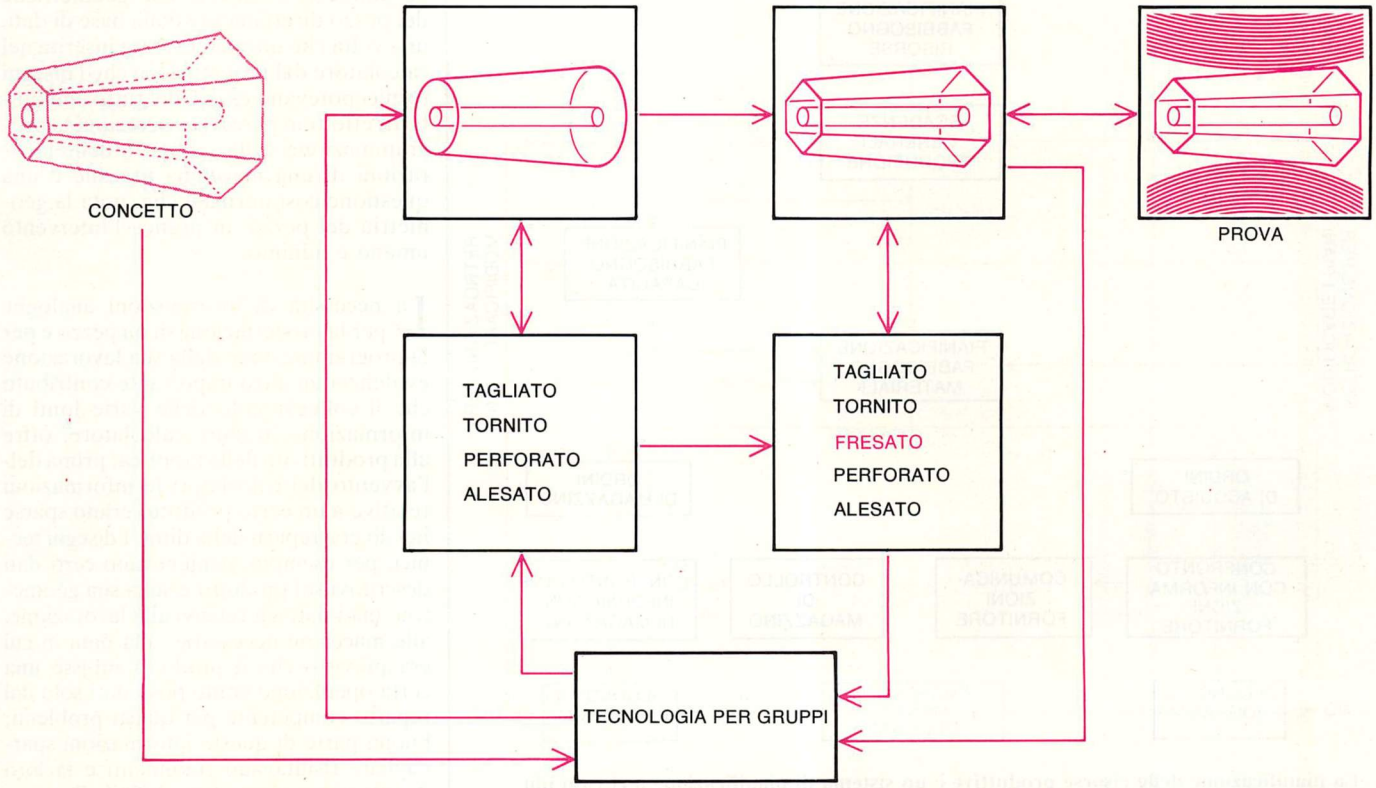
A SEZIONE CIRCOLARE
SQUADRATO
TORNITO, MOLATO
± 0,0001 POLLICI
ACCIAIO
0,11 - 0,5 ORE



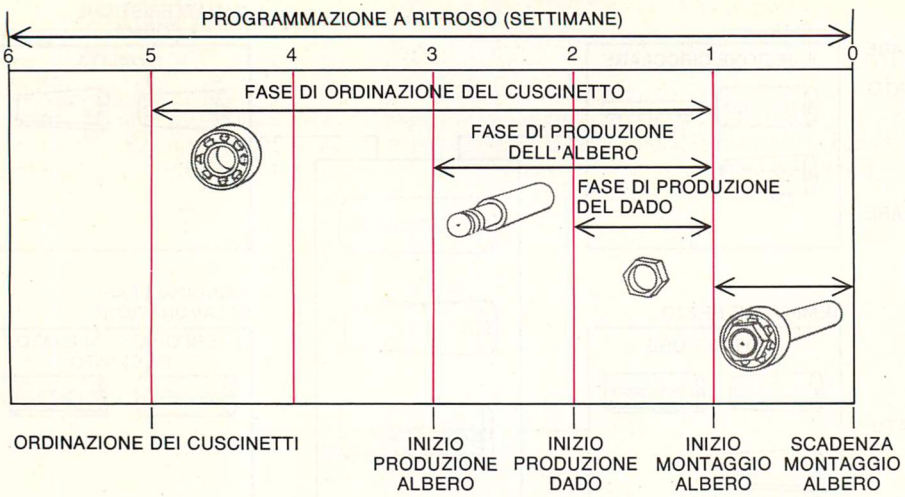
A SEZIONE
RETTANGOLARE
SVASATO
FORATO, MOLATO
± 0,001 POLLICI
ACCIAIO
0,011 - 0,1 ORE



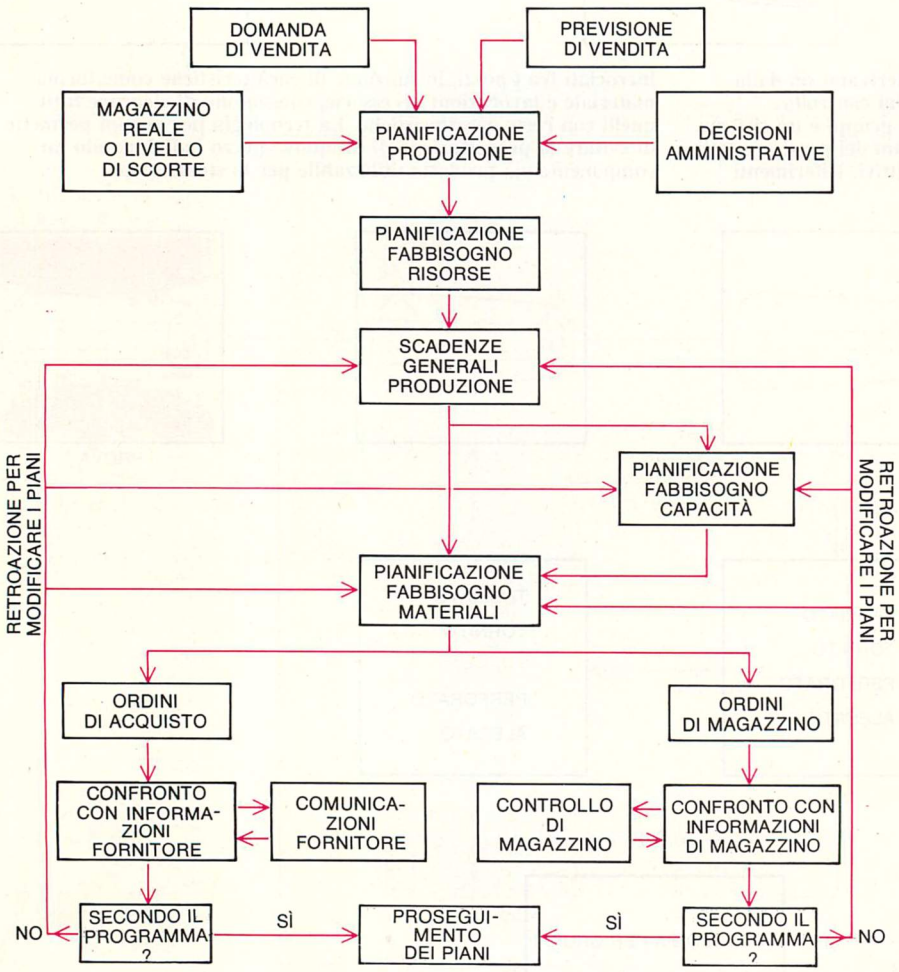
I benefici della meccanizzazione in fabbrica derivano sia dalla gestione più efficiente delle informazioni sia dal controllo automatico dei macchinari. La tecnologia per gruppi è un sistema di catalogazione elettronica che raccoglie i nomi dei pezzi prodotti da un'azienda e un elenco dei loro dati descrittivi. Riferimenti incrociati fra i pezzi, in funzione di caratteristiche come forma, materiale e lavorazioni necessarie, consentono di elencare tutti quelli con certe caratteristiche. La tecnologia per gruppi permette di evitare la progettazione di un nuovo pezzo individuando un componente già prodotto utilizzabile per lo stesso scopo.



La tecnologia per gruppi semplifica la pianificazione dei progetti e delle procedure. Se occorre un pezzo nuovo, si può esaminare l'inventario di vecchi pezzi nell'archivio elettronico alla ricerca di quelli con caratteristiche simili. Se, per esempio, si desidera un componente a tronco di piramide, in acciaio, perforato lungo l'asse radiale, l'inventario può fornire un pezzo già in produzione perforato e a tronco di cono e l'elenco delle fasi della sua costruzione. Si può così modificare il progetto e la procedura di lavorazione precedenti senza ricominciare da zero. Il nuovo pezzo può essere collaudato con un apposito programma al calcolatore per verificare che soddisfi le specifiche tecniche; infine progetto e procedura sono immagazzinati nell'archivio.



Per stabilire quando bisogna fabbricare o acquistare dai fornitori certi pezzi, occorre programmare a ritroso le lavorazioni partendo dalla scadenza entro cui il prodotto deve essere finito. Se un componente è pronto proprio quando occorre e non prima, si possono evitare molte spese connesse alla gestione di un magazzino di pezzi (assicurazione, costo dei locali, capitale immobilizzato). Per ridurre le dimensioni degli stock di magazzino senza causare ritardi, però, la programmazione a ritroso delle scadenze deve essere completa e accurata. L'illustrazione si riferisce al caso di un oggetto con tre componenti: una programmazione accurata richiede un'analisi attenta dei tempi di permanenza e di lavorazione dei pezzi e una perfetta conoscenza della situazione di magazzino.



La pianificazione delle risorse produttive è un sistema di pianificazione a ritroso più complesso in cui la situazione di magazzino, quella della domanda, le previsioni di vendita e le scelte prioritarie di gestione contribuiscono a determinare i piani di produzione generali; da questi il calcolatore ricava i piani di produzione particolari relativi a migliaia di pezzi, ai materiali e alle varie procedure. Il successo del sistema dipende da un pronto ritorno delle informazioni sulla situazione dei pezzi, dei materiali e delle altre risorse che devono soddisfare le scadenze stabilite.

gettazione al calcolatore. All'inizio il sistema veniva immaginato soltanto come un raffinato strumento per il disegno: l'ingegnere progettista avrebbe usato una tastiera per specificare alcuni dati numerici sull'oggetto, ma avrebbe potuto anche passare una matita luminosa sullo schermo di un tubo a raggi catodici per «disegnare», o immettere nel calcolatore dati geometrici. Il percorso della matita sullo schermo avrebbe potuto essere solo un'approssimazione della sagoma del pezzo, poiché il calcolatore era programmato per riunire dati geometrici e numerici e trasformare lo schizzo del progettista in un preciso disegno tecnico; inoltre il disegno, immagazzinato nella memoria del calcolatore, poteva essere richiamato in qualsiasi momento.

Le informazioni che specificano le caratteristiche geometriche di un pezzo servono anche a determinare come usare una macchina utensile, per esempio un tornio, per produrlo. (Per specificare un procedimento di fresatura bisogna tenere in considerazione anche le possibilità della fresatrice usata, il materiale di cui è fatto il pezzo, la forma dell'utensile, la profondità del taglio e altre variabili.) Tradizionalmente l'addetto alla macchina la predisponeva secondo i disegni forniti dal progettista; anche dopo l'introduzione delle macchine utensili a controllo numerico il programmatore che stabiliva la successione delle istruzioni otteneva i dati geometrici mediante disegni. Ma progettisti e programmatori si resero presto conto che il programmatore poteva desumere le caratteristiche geometriche del pezzo direttamente dalla base di dati, una volta che questa era stata inserita nel calcolatore dal progettista, e che i disegni tecnici potevano essere del tutto eliminati. In effetti in parecchie occasioni la programmazione della sequenza delle lavorazioni di una macchina utensile è una questione così normale che, nota la geometria del pezzo, in pratica l'intervento umano è minimo.

La necessità di informazioni analoghe per la progettazione di un pezzo e per la programmazione della sua lavorazione evidenzia un altro importante contributo che il collegamento delle varie fonti di informazione, tramite calcolatore, offre alla produttività della fabbrica: prima dell'avvento dei calcolatori le informazioni relative a un certo prodotto erano sparse nei diversi reparti della ditta. I disegni tecnici, per esempio, contenevano certi dati descrittivi sul prodotto e sulla sua geometria, ma i dettagli relativi alla lavorazione, alle macchine necessarie, alla data in cui era previsto che il prodotto subisse una certa operazione erano posseduti solo dal reparto competente per questi problemi; buona parte di queste informazioni sparpagliate risultavano ridondanti e la loro distribuzione ne rendeva difficile l'aggiornamento e la verifica.

I miei colleghi e io abbiamo identificato sei aree funzionali che oggi si cerca di collegare per amministrare il flusso delle informazioni nella fabbrica; queste aree

sono la progettazione; l'immagazzinamento e il recupero delle informazioni sui pezzi in lavorazione; la gestione e il controllo delle risorse disponibili (in termini di manodopera, macchine e materiali) al variare delle esigenze; la movimentazione dei materiali; il controllo delle macchine utensili e di tutti gli altri macchinari dedicati e il controllo dei robot. Collegando queste sei aree si può ottenere quella che Joseph Harrington, Jr., della Arthur D. Little, Inc., ha definito produzione integrata tramite calcolatore. È però importante rendersi conto del fatto che le tecnologie informatiche devono essere piuttosto ben sviluppate in ciascun settore prima di poter ottenere benefici dal loro collegamento.

L'esempio forse più notevole di aumento della produttività grazie alle tecnologie informatiche è la loro applicazione alla progettazione di pezzi e alle procedure di lavorazione. I programmi di progettazione assistita dal calcolatore (CAD, *computer-aided design*) effettuano manipolazioni geometriche con tale rapidità, che il progettista non deve più ridursi alle viste in pianta, frontale e laterale che erano tipiche dei disegni a mano: ora può esaminare sullo schermo il pezzo in rotazione attorno a un asse qualsiasi, effettuare uno «zoom» per osservare i particolari o assumere un punto di osservazione più lontano per avere un'immagine di insieme; è anche possibile visualizzare una qualunque sezione dell'oggetto. Se poi occorre far combaciare il pezzo con altri per il montaggio, il progettista può farli muovere sullo schermo per controllare; in questo modo è possibile eliminare molti prototipi e modelli.

L'immagine che compare sullo schermo può essere immagazzinata permanentemente su un nastro o un disco magnetico; se occorre se ne può produrre rapidamente una copia su carta tramite un plotter controllato dal calcolatore e, dato che è facile modificare il progetto nella sua forma elettronica, si possono fare tutte le modifiche necessarie evitando la gravosa fatica di rifare i disegni. Non appena viene archiviato elettronicamente, il progetto diventa accessibile a chiunque vi debba lavorare, cosicché attività come la pianificazione della produzione e la determinazione delle scadenze possono avere avvio più rapido; poiché poi le modifiche sono compiute direttamente sulla versione dell'archivio centrale, vi è meno pericolo che qualcuno si trovi a lavorare su un progetto superato.

La facilità di accesso ai progetti in tutta la ditta tende ad abbattere le barriere istituzionali tra i reparti di progettazione e quelli produttivi; la possibilità di esaminare il pezzo sotto qualsiasi orientamento, a qualunque scala e in ogni sezione rende l'idea originale del progettista molto più chiara di quanto non sia in un normale disegno a tre viste. I tecnici possono poi analizzare la resistenza del pezzo ai vari tipi di sforzo senza costruire modelli o prototipi.

Anche questa analisi viene effettuata con l'aiuto di un calcolatore su un terminale video; secondo uno dei metodi, detto analisi degli elementi finiti, il pezzo viene diviso in numerosi piccoli elementi, le celle, e si osserva la reazione di ciascun elemento allo sforzo: il calcolatore può per esempio produrre un'immagine del pezzo come apparirebbe se fosse deformato da una sollecitazione meccanica, mostrando dove si trovano le regioni più deboli. Altre proprietà che variano con la posizione, come la conduttività termica o elettrica, possono essere rappresentate attribuendo a ogni cella un colore convenzionale.

L'impiego della progettazione assistita dal calcolatore aumenta di solito la produttività della sala disegni di tre volte o più e ha spesso portato all'imprenditore vantaggi impressionanti. Alla General Motors, per esempio, la riprogettazione di un'intera automobile è arrivata a richiedere 14 mesi invece dei 24 prima normali; un'altra azienda ha ridotto il tempo necessario per progettare valvole speciali su commissione da sei mesi a uno. Un fabbricante di stampi per componenti in plastica è riuscito ad accrescere la sua produzione da 30 a 140 sagome all'anno unicamente grazie all'aumento di efficienza reso possibile da un sistema di progettazione al calcolatore. Inoltre i massimi risparmi risultanti dai sistemi di progettazione assistita dal calcolatore si hanno spesso nella fase di montaggio del prodotto finale, che la qualità superiore delle parti rende più facile e rapida.

Occorre che i dati immagazzinati in un calcolatore, che stabiliscono le caratteristiche geometriche di un pezzo e le varie fasi della sua lavorazione, non siano utili solo per il pezzo per cui sono state originariamente progettate: volendo progettare un nuovo pezzo e pianificarne l'itinerario attraverso la fabbrica è utile richiamarsi a un progetto e a una lavorazione già attuati per un pezzo analogo. Alla necessità di individuare rapidamente questi pezzi già in uso può venire incontro un sistema di archiviazione razionale dei dati riguardanti i pezzi, un sistema che si chiama tecnologia per gruppi.

La tecnologia per gruppi consiste in un archivio elettronico di schede che elencano ogni pezzo fabbricato dalla ditta, unito a un sistema per la selezione delle schede secondo le varie caratteristiche dei pezzi. Questi possono essere classificati in qualunque modo l'azienda ritenga utile; di solito i pezzi sono catalogati a seconda di certe caratteristiche fisiche come la forma, le dimensioni, il volume e i materiali usati, come pure secondo certe caratteristiche del processo di fabbricazione quali il tempo necessario per l'allestimento dei macchinari, la successione delle lavorazioni e il numero di pezzi che costituiscono una singola partita. Una volta classificati certi componenti, il programmatore di processo può rintracciare un elenco di componenti con alcune caratteristiche in comune: può così stendere i piani per la produzione di un nuovo pezzo semplicemente richiamandosi a quelli di un pezzo precedente e annotando le differenze. Questa pratica è detta programmazione parametrizzata delle procedure.

Il risparmio di energie che la tecnologia per gruppi rende possibile è notevole: le analisi hanno dimostrato che in molte aziende solo il 20 per cento dei pezzi per cui si era ritenuto necessario un progetto nuovo ne richiedono effettivamente uno; dei rimanenti il 40 per cento può essere costruito utilizzando progetti precedenti e l'altro tramite vecchi progetti modificati. La tecnologia per gruppi può essere applicata non solo alla pianificazione, ma anche alla scelta dei macchinari per la produzione: le macchine stesse si possono raggruppare secondo i pezzi per la cui produzione vengono utilizzate o possono essere divise in piccoli sottogruppi, ciascuno dedicato alla produzione di una certa classe di pezzi. La ripartizione permette una maggiore produttività e uno sfruttamento più efficace dei macchinari.

L'assegnazione delle risorse disponibili in modo da ottimizzare i profitti o la produttività sarebbe un problema matematico troppo difficile: i metodi della teoria delle code e della programmazione lineare dovrebbero essere applicati in un contesto comprendente magari centinaia di macchine e di lavoratori, migliaia di possibili prodotti e un numero praticamente illimitato di percorsi che ogni ipotetico prodotto potrebbe seguire durante la produzione. Tuttavia nella fabbrica di oggi il problema vero non sta nel determinare la miglior combinazione possibile di manodopera, macchine e prodotti: di solito l'organizzazione della produzione è talmente lontana dall'optimum matematico che anche una soluzione evidentemente subottimale può portare a miglioramenti sostanziali. La necessità immediata è quella di un metodo di programmazione e di controllo relativamente semplice, in grado di ridurre drasticamente i lunghi tempi d'attesa e di eliminare la maggior parte dei costi di magazzino.

Attualmente vi sono diversi modi in cui un calcolatore può facilitare la programmazione e il controllo: il metodo più semplice si chiama pianificazione delle risorse produttive e cerca di prevedere la domanda di ogni elemento del processo produttivo in un dato momento. Un programma di questo tipo potrebbe per esempio indicare quante fresatrici (e quanti addetti per ogni macchina) sono necessarie in una fabbrica dove si preparano diversi prodotti che richiedono la fresatura. Il metodo è lo sviluppo di un sistema introdotto dalla IBM nel 1968 per determinare in quale momento della produzione vengano richiesti determinati materiali. L'idea fondamentale della pianificazione delle risorse produttive è che le scadenze di impiego della manodopera, dei materiali e delle macchine e delle altre risorse richieste per la produzione di un prodotto possono venire stimate con un'estrapolazione a ritroso a partire dalla data di consegna prevista; se le scadenze sono programmate con cura non vi è alcun bisogno di tenere una scorta di pezzi in magazzino senza sapere se serviranno:

ogni pezzo può essere fabbricato subito prima di venire impiegato.

Supponiamo che una ditta voglia produrre 50 paia di cesoie da giardiniere da spedire l'1 settembre: per determinare quante impugnature in legno si devono fabbricare e per quando devono essere pronte, il sistema di pianificazione delle risorse produttive consulta una tabella articolata dei materiali necessari per le cesoie da giardiniere. Occorrono due manici per ogni paio di cesoie; il sistema determina poi che occorrono, poniamo, una settimana per montare 50 cesoie e due per ricavare dal legno grezzo 100 impugnature. Il fornitore di legnami chiede una settimana di preavviso per la consegna, quindi il sistema emette automaticamente un ordine per il legname il 4 agosto, cioè quattro settimane prima che le cesoie debbano essere pronte per l'invio; il sistema potrebbe anche emettere ordini per altro legno da tenere in magazzino, ma le riserve sarebbero tenute solo nella quantità necessaria a coprire eventuali imprevisti nei rifornimenti, e non nel fabbisogno.

Per introdurre con successo la pianificazione delle risorse produttive una ditta deve avere informazioni precise sui pezzi necessari a ogni stadio del montaggio di un prodotto, sul tempo necessario per fabbricare ciascun pezzo (includendo non solo il tempo effettivo di lavorazione ma anche quello occorrente per predisporre le macchine, per trasferire il pezzo da una fase all'altra e per i ritardi mentre il pezzo è fermo a ogni stazione in attesa di essere lavorato), sui tempi necessari per acquistare alcuni pezzi dai fornitori e sul proprio magazzino. Molte aziende hanno fallito al loro primo tentativo di installare un sistema di pianificazione delle risorse produttive proprio per mancanza di dati sufficienti su tutti questi fattori.

Ciononostante sono stati sviluppati più di 100 di questi sistemi, che sono stati messi in opera in più di 10 000 diversi luoghi di produzione. La loro efficacia ha trovato la migliore dimostrazione in certe fabbriche dove si lavorano un gran numero di prodotti in quantità relativamente piccole; in circostanze del genere il mantenimento di un vasto magazzino avrebbe comportato un grosso taglio dei profitti: sono state raggiunte riduzioni degli stock in magazzino anche di un terzo ed economie fino al 6 per cento nel costo di componenti acquistati all'esterno.

La pianificazione delle risorse produttive funziona piuttosto bene nelle officine meccaniche che lavorano su commissione, dove si producono molti pezzi in quantità diverse; quando la produzione è più ripetitiva, però, può risultare più efficace un sistema sviluppato dalla Toyota Motor Co. Ltd., detto sistema Kanban. Nel sistema Kanban l'invio dell'ordine di produzione di alcuni pezzi a una certa stazione avviene solo in seguito alla richiesta della successiva stazione della catena. Un singolo ordine di prodotto finito che parte dalla fine della catena mette in moto una successione di ordini da stazione a stazione: ogni componente del prodotto finito, per esempio un'automobile, viene spostato lungo la catena dalla successione di ordini emessi al momento giusto. Così, a differenza del sistema di pianificazione delle risorse produttive, che è basato su una pianificazione dettagliata e centralizzata di tutti i montaggi parziali, dei pezzi e delle materie prime e su un pronto ritorno delle informazioni da ogni stazione, il sistema Kanban dipende unicamente dalla programmazione centrale del numero di prodotti finiti. Inoltre nel Kanban i vari pezzi sono prodotti nelle quantità strettamente necessarie, senza un margine per gli errori e gli scarti, una caratteristica del sistema che richiede standard di controllo della qualità oggi soddisfatti principalmente dall'industria giapponese. I programmi per i calcolatori del futuro riuniranno probabilmente le caratteristiche migliori della pianificazione delle risorse produttive per la produzione di piccole partite e quelle del sistema Kanban (almeno fin dove le società occidentali ne possono adottare i metodi) per la produzione più ripetitiva.

Il progetto e la sua analisi tecnica possono essere compiuti con efficienza sul terminale di un calcolatore dotato di programmi specifici. L'operatore agisce sul terminale immettendo dati e ordini tramite tastiera, usando gli ordini previsti in un apposito repertorio (il «menù») o toccando con un'apposita matita lo schermo di un tubo a raggi catodici (o una superficie davanti allo schermo che corrisponda a esso punto per punto); si possono anche trasmettere gli ordini di uso meno frequente con un quadro di comando tascabile. Le fotografie illustrano l'analisi delle sollecitazioni che agiscono su un dispositivo a piastra di collegamento: si produce un modello (*a*) che è poi schematicamente fissato a un basamento; si fa passare un perno nei due manicotti e si applica una forza orientata verso l'alto da analizzare (*b*). Per stabilire l'effetto della forza su un manicotto se ne ricava un ingrandimento assieme al perno (*c*) e lo si seziona in una matrice di piccole regioni lungo una serie di piani (*d*). Per una migliore visualizzazione, le varie regioni sono leggermente rimpicciolite in modo da risultare separate. La riduzione è effettuata solo per chiarezza e non influisce sull'analisi. Poi si fa ruotare l'anello sullo schermo nella sua condizione di riposo in modo che l'asse sia perpendicolare allo schermo (*e*). Infine si calcola la massima distorsione del manicotto sotto carico, visualizzata in modo che la distorsione nella direzione di applicazione della forza sia 100 volte superiore che nelle altre direzioni (*f*). Le immagini sono della Computer Corporation di Bedford nel Massachusetts.

I principi fondamentali della pianificazione delle risorse produttive si possono sviluppare in vari modi: si può controllare l'emissione di ordini per certi pezzi riferendosi alla data in cui il prodotto finito deve raggiungere un particolare magazzino o un centro di distribuzione, invece che alla data di spedizione, in modo da garantire una maggiore puntualità. Questo metodo di programmazione si chiama pianificazione delle risorse alla distribuzione, e deve tener conto del tempo necessario per la spedizione; può essere usato per stabilire le date di spedizione dei vari prodotti, che possono poi essere sottoposte all'elaborazione di un sistema di pianificazione delle risorse produttive.

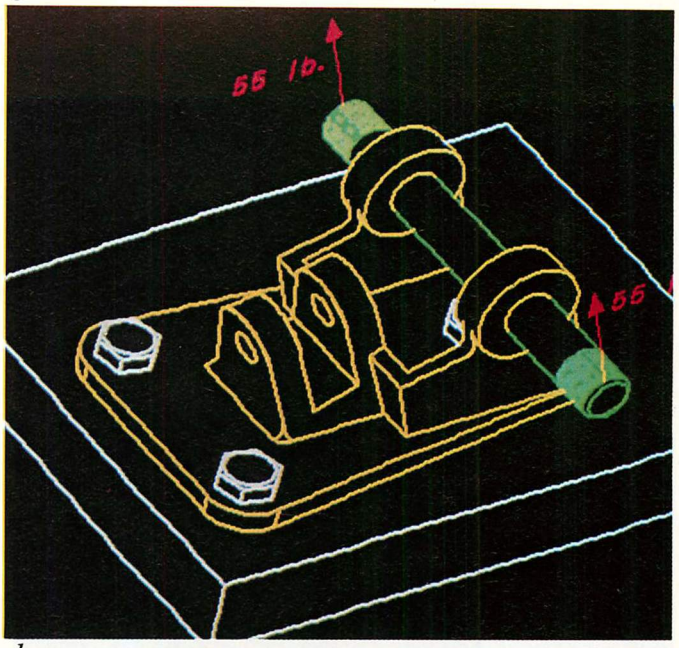
Il calcolatore può raccogliere rapidamente dati da un sistema di pianificazione della produzione o della distribuzione per produrre rapporti riassuntivi destinati all'amministrazione della società; questi bollettini possono riportare per esempio il volume complessivo di ordini arretrati, le disponibilità di magazzino, la quota di produzione giornaliera e la differenza giorno per giorno tra il materiale immesso nell'impianto e quello che ne esce. Se l'amministrazione desidera valutare quote alternative di produzione o di magazzino, per esempio, il calcolatore può simulare rapidamente le conseguenze dei provvedimenti sugli altri reparti della ditta. Per di più, una volta scelto un certo piano di produzione, è possibile ottimizzarlo grazie alle tecniche matematiche più rigorose della programmazione lineare e della teoria delle code.

Un requisito comune a tutte le versioni della pianificazione delle risorse è la necessità di un pronto ritorno di informazioni sulle lavorazioni in officina. I dati sul movimento dei materiali, le prestazioni dei lavoratori e delle macchine e il livello delle presenze possono venire raccolti in vari modi: si possono per esempio «timbrare» i cartellini degli operai con un codice accessibile ai calcolatori, del tipo, per esempio, del codice universale dei prodotti, in modo da accreditare automaticamente a ogni lavoratore le ore lavorate indicate dall'orologio della ditta. Si può codificare allo stesso modo la documentazione che accompagna il materiale di una stessa commessa attraverso le varie fasi della lavorazione, o lo stesso prodotto finito. È possibile inviare al calcolatore messaggi da tastiera tramite terminali in tutta la fabbrica; questi dati permettono all'amministrazione di valutare se un pezzo soddisfa la tabella di marcia elaborata dal sistema di pianificazione e, in caso contrario, di decidere quali provvedimenti prendere. Non è neppure necessario che il ritorno delle informazioni al centro sia immediato; nella maggior parte dei casi è sufficiente provvedere all'aggiornamento una o due volte al giorno.

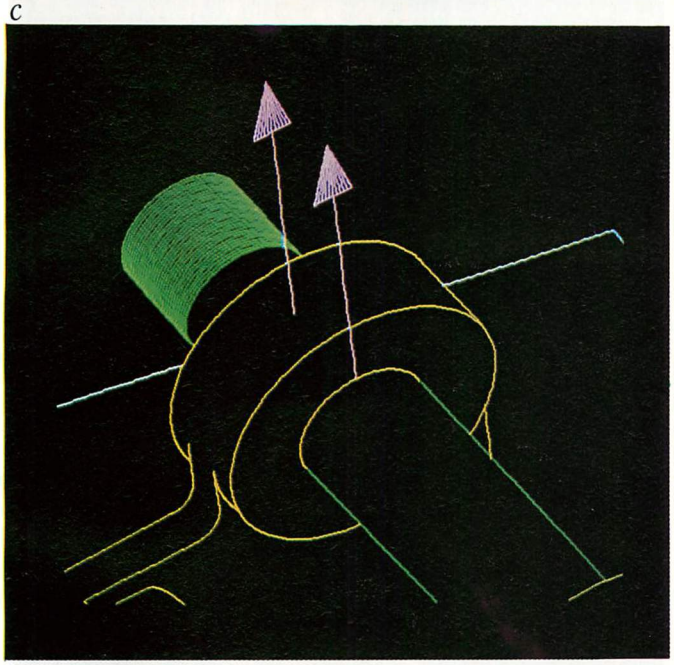
Uno dei benefici più importanti di un sistema di pianificazione e controllo delle risorse produttive consiste nella possibilità per l'azienda di rispondere rapidamente al variare delle condizioni del mercato; prima dell'adozione dei sistemi di pianificazione automatica rispondere alle variazioni di priorità era di competenza del responsabile delle consegne, e questo ruolo toccava di solito al caporeparto. L'installazione di questi sistemi permette perciò al caporeparto di tornare a fare il caporeparto, cioè di dedicarsi a dirigere un gruppo di lavoratori invece di impiegare tutto il suo tempo tentando di ovviare

a

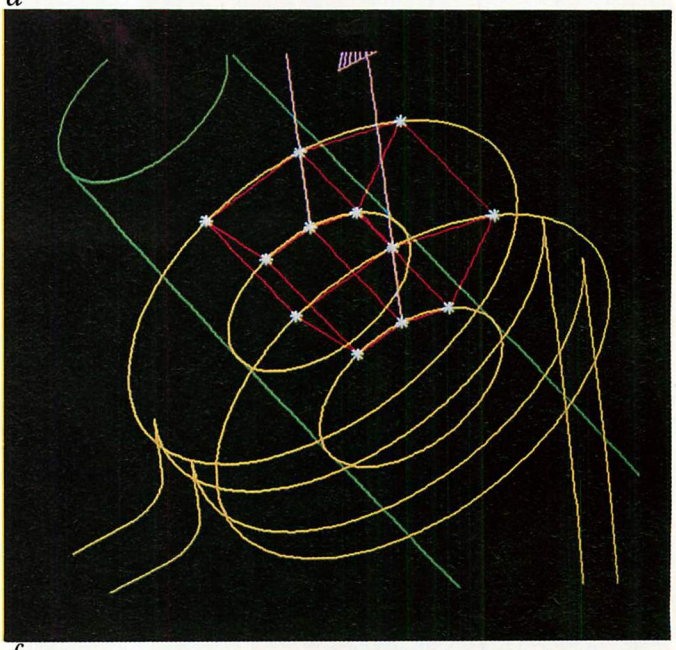
b



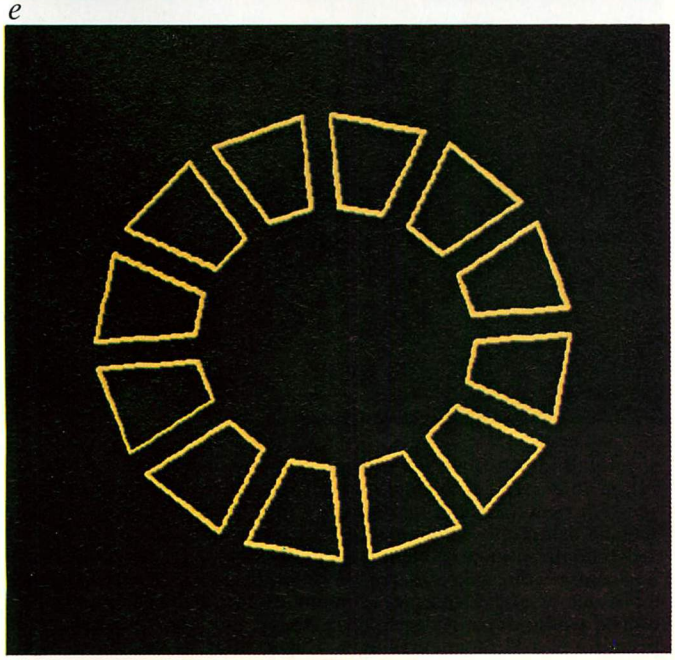
c



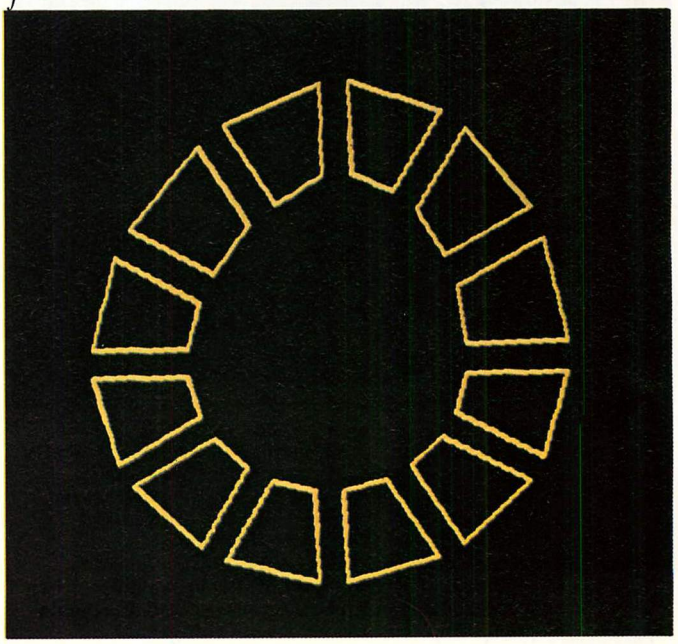
d



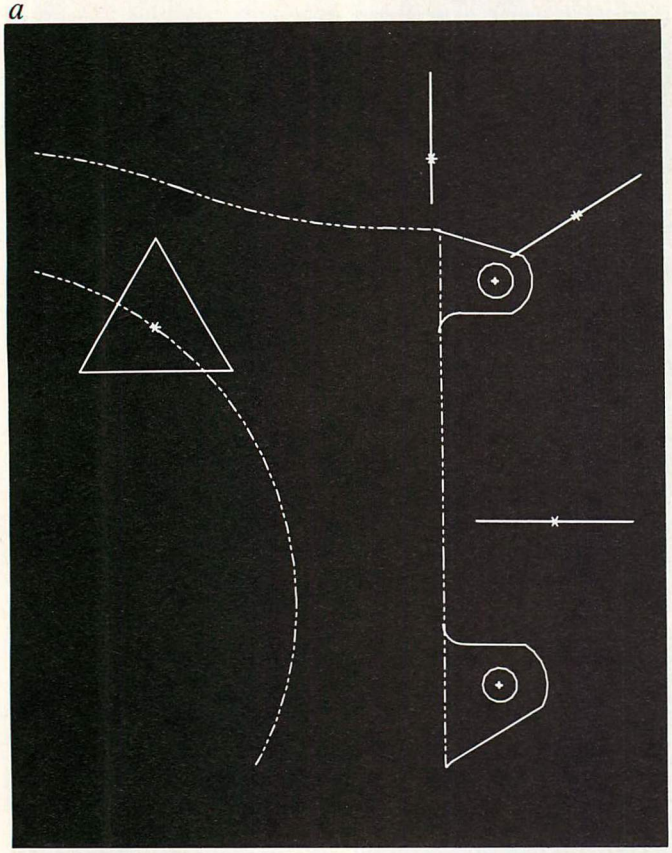
e



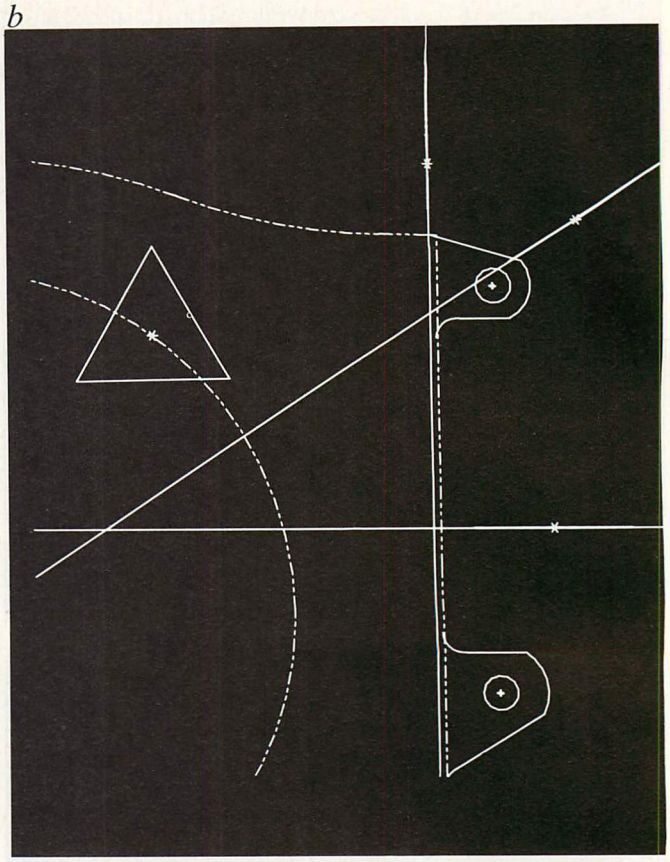
f



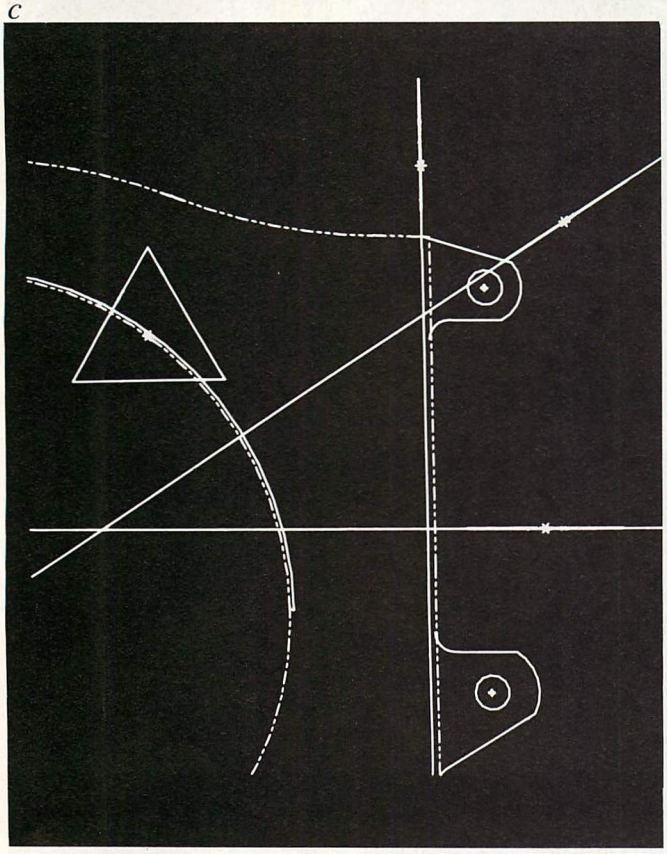
a



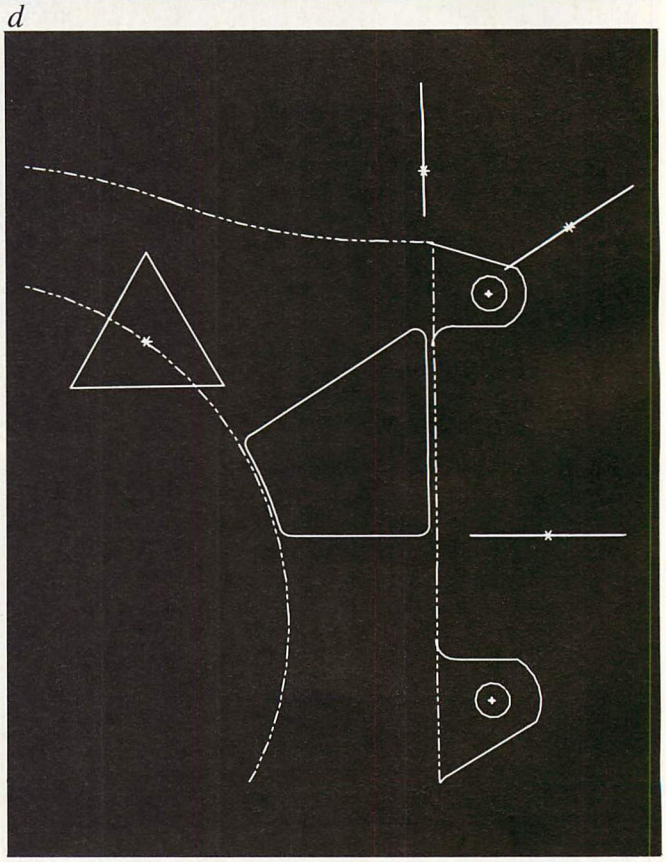
b



c

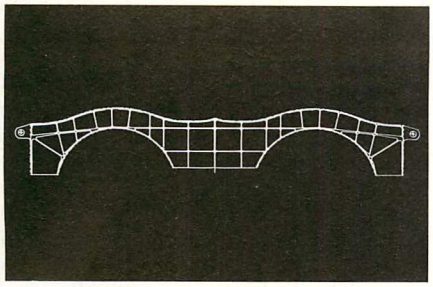


d

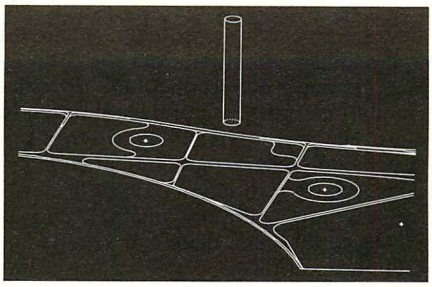


Un terminale per la progettazione assistita da calcolatore permette di ottenere forme complesse combinando forme più semplici. In *a* un terminale visualizza lo schizzo di una parte della sezione superiore di un'ordinata per il caccia F-15. Tre segmenti contrassegnati da asterischi individuano altrettanti piani perpendicolari al piano dello schermo; l'orientamento del piano dell'ordinata è indicato da un triangolo con un asterisco: quando il triangolo è equilatero, come in questo caso, l'ordinata è parallela al piano dello schermo. In *b* sono raffigurate le rette di intersezione fra i tre piani perpendicolari e il piano dell'ordinata. In *c* il calcolatore ha tracciato una curva leggermente spostata rispetto a una precedente e in *d* i vertici della regione delimitata dalla curva e dalle tre rette sono arrotondati automaticamente. Le dimensioni della regione, pur non comparendo sullo schermo, sono immagazzinate nel calcolatore e possono essere riutilizzate al momento dell'analisi tecnica o dello studio di un progetto di processo. Le immagini sono state prodotte alla McDonnell Douglas Corporation di St. Louis.

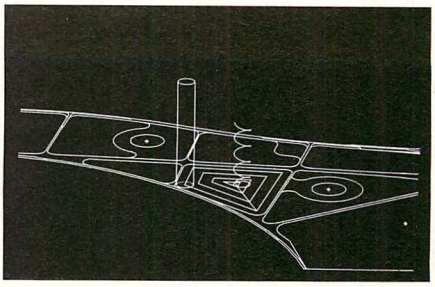
1a



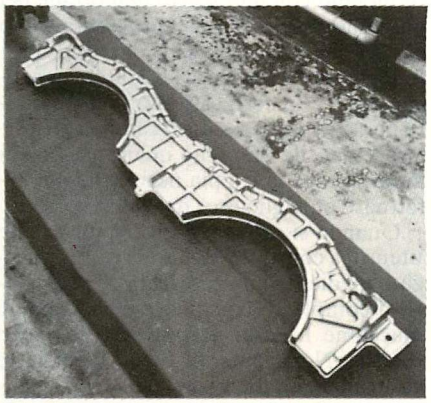
2a



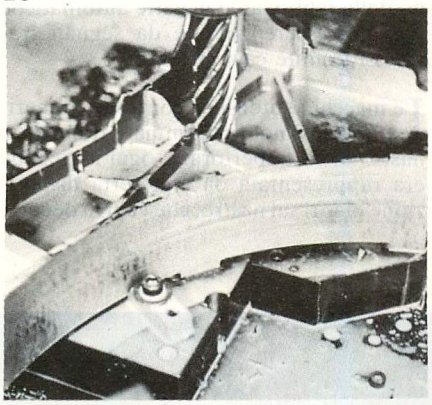
3a



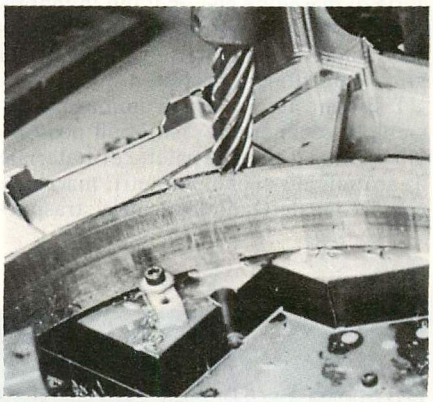
1b



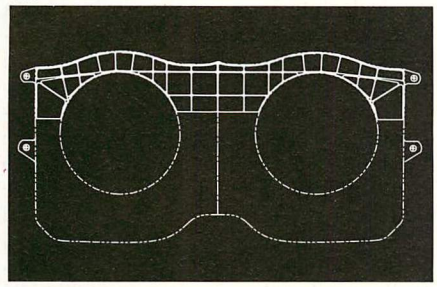
2b



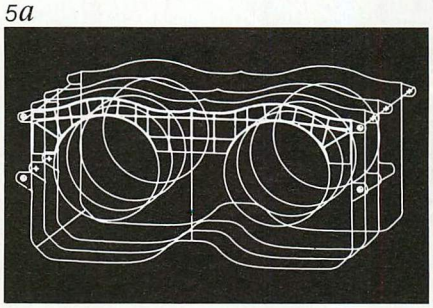
3b



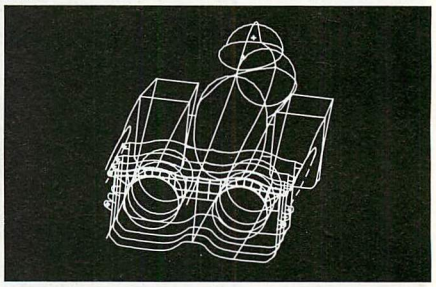
4a



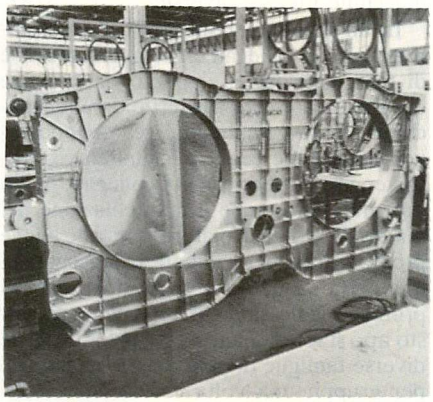
5a



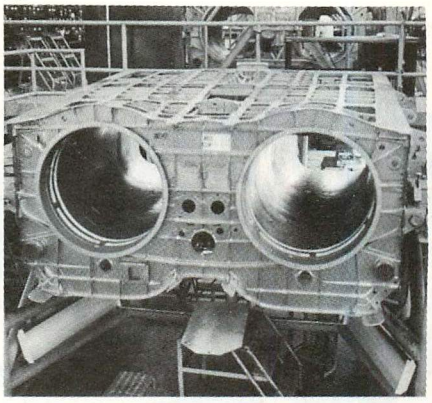
6a



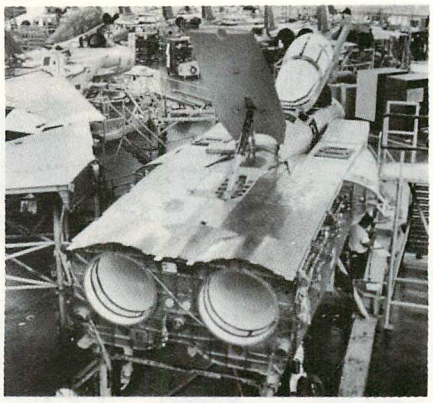
4b



5b



6b



Le fasi della fresatura di precisione della metà superiore di un'ordinata di un F-15 sono mostrate in una simulazione al calcolatore (*fotografie in alto*) e come appaiono realmente in fabbrica (*fotografie in basso*). La forma e le dimensioni finali del pezzo, fornite al calcolatore dal progettista (*1a*), servono come dati di ingresso per un programmatore, che specifica il percorso di un utensile da taglio sul pezzo forgiato grezzo (*1b*). L'utensile è posto in posizione sul pezzo (*2a, 2b*) e vi penetra lungo una traiettoria a spirale, asportando una porzione sempre più ampia del pezzo forgiato (*3a, 3b*). L'azione della fresatrice è controllata dal calcolatore. Tre teste di incisione sono montate in parallelo per poter lavorare tre ordinate alla volta; ogni testa può muoversi lungo tre assi nello spazio e inclinarsi attorno ai due assi orizzontali, e lavora i pezzi con una tolleranza dell'ordine del micrometro. Il pezzo lavorato è poi fissato a un altro analogamente preparato per formare l'ordinata completa (*4a, 4b*). Il montaggio della cellula dell'F-15 non è ancora stato automatizzato, ma può essere pianificato sullo schermo di un calcolatore. Le fotografie in alto rappresentano le fasi simulate del montaggio, mentre quelle in basso si riferiscono alle fasi corrispondenti nello stabilimento. L'ordinata è unita a tre ordinate analoghe a costituire la sezione centrale dell'aereo (*5a, 5b*), poi si unisce questa sezione a quella frontale (*6a, 6b*) e infine si aggiungono le sezioni alare e di coda (*7a, 7b*).

alla mancanza di certi pezzi, ordinando la riparazione delle macchine guaste e accompagnando lungo tutta la catena il più in ritardo tra gli elementi di massima priorità, perché ne esca il più presto possibile.

Per quanto io mi sia soffermato particolarmente sui mutamenti nell'organizzazione dell'impresa produttiva nel suo complesso, è in continuo progresso anche la meccanizzazione delle varie operazioni che avvengono nella fabbrica vera e propria. Le tecnologie informatiche sono applicabili al controllo di tre grandi categorie di macchine che operano in fabbrica: le macchine per il trasporto e l'immagazzinamento dei materiali, quelle per la loro lavorazione e i robot.

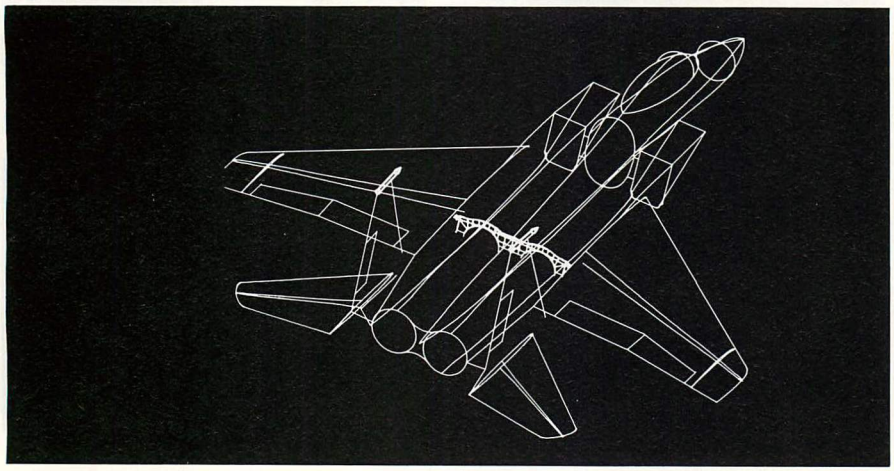
I sistemi automatici di immagazzinamento e recupero dei materiali possono introdurre ed estrarre palette di materiale da scaffali alti anche 30 metri; macchine più piccole, dette minicaricatrici, trasportano cassetti contenenti i pezzi più piccoli. In entrambi i casi è possibile scegliere un pezzo in base a un numero o alla collocazione e mettere in azione una «navetta» che automaticamente preleva il pezzo in questione. Un sistema di questo tipo è in sostanza un magazzino automatico in cui delle navette sostituiscono i carrelli elevatori e i loro operatori umani; analogamente certi sistemi di veicoli a guida automatica sostituiscono i nastri trasportatori e i carrelli a mano per il trasporto dei materiali da e per il magazzino e all'interno della fabbrica; le navette automatiche possono essere guidate da segnali trasmessi tramite cavi interrati.

Le macchine utensili a controllo numerico venivano programmate tramite un nastro di carta perforata: ogni istruzione era rappresentata da una certa disposizione di fori sul nastro, che veniva decodificata da un lettore ottico o meccanico collegato direttamente alla macchina. Nella maggior parte dei casi questo lettore è stato sostituito da un piccolo calcolatore digitale installato sulla macchina. Un moderno utensile a controllo numerico computerizzato può raggiungere le dimensioni di una casetta e comprendere una testa di incisione in grado di ruotare indipendentemente attorno a diversi assi contemporaneamente; il controllo da parte del calcolatore permette alla macchina di eseguire automaticamente tagli su metallo con uno scarto dell'ordine del micrometro. Per di più il programma può evitare che la macchina incida troppo profondamente il pezzo da lavorare, danneggiandolo, e in certi casi può segnalare all'operatore la necessità di cambiare o affilare l'utensile da taglio quando i sensori indicano che la coppia necessaria per effettuare un taglio esce dai valori corretti.

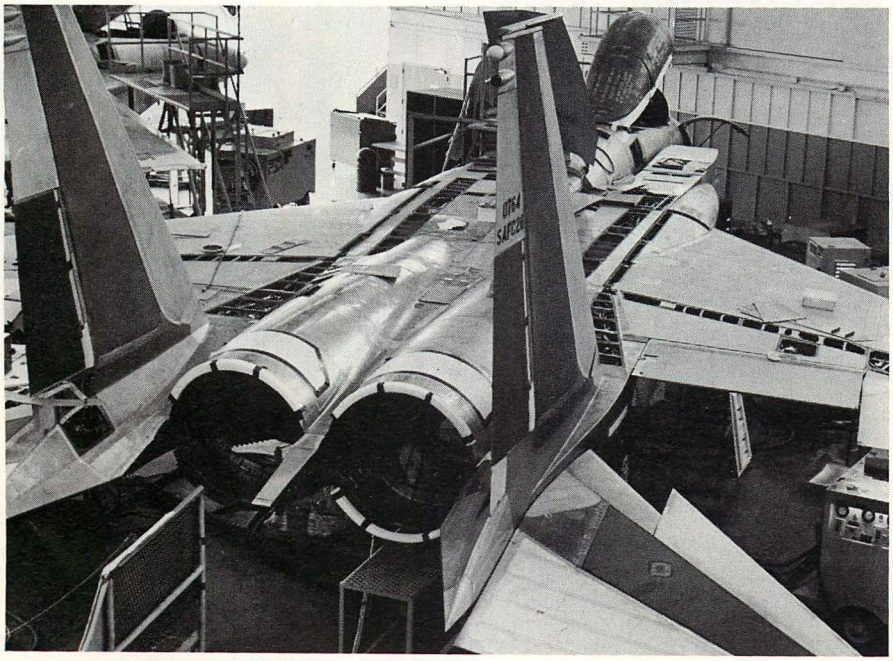
Quando si collegano diverse macchine utensili a controllo numerico computerizzato mediante una gerarchia di calcolatori, il complesso costituisce un sistema di macchine utensili a controllo numerico diretto. Normalmente ogni macchina è controllata da un microcalcolatore, mentre diversi microcalcolatori vengono collegati tramite un minicalcolatore e vari minicalcolatori sono connessi a loro volta a un grande calcolatore centrale. I programmi per la fabbricazione di tutti i pezzi prodotti dall'azienda possono essere raccolti in una banca di dati centrale e trasferiti dal calcolatore centrale a qualunque macchina della rete; in più tutti i dati sulle condizioni di ogni macchina, sul volume della sua produzione e sulla qualità dei prodotti finiti possono essere ritrasmessi al calcolatore centrale dalle unità di controllo periferiche: in una gerarchia del genere si possono collegare fino a 100 macchine utensili diverse.

In un sistema a controllo numerico diretto l'unico collegamento tra gli utensili è di tipo elettronico; il pezzo da lavorare deve ancora essere trasferito da una macchina all'altra manualmente: quando diverse macchine a controllo numerico diretto vengono ulteriormente collegate da un sistema di trasporto e manipolazione dei materiali e il calcolatore centrale viene programmato per azionare le macchine in una certa sequenza si parla di sistema di produzione flessibile. In un sistema di questo tipo si selezionano per la lavorazione le diverse famiglie di pezzi con la tecnologia per gruppi; una volta che la paletta dei pezzi da lavorare sia stata collocata in posizione, i pezzi avanzano automaticamente da una macchina all'altra dove subiscono le lavorazioni nella sequenza corretta: il caricamento del sistema avviene anche solo una volta al giorno, e per il resto del tempo occorre un solo addetto per la supervisione. Per di più la frazione del tempo di funzionamento in cui ciascuna macchina compie effettivamente delle lavorazioni può arrivare a valori fra il 50 e il 90 per cento, mentre per una macchina utensile a controllo numerico computerizzato isolata questo valore può addirittura aggirarsi fra il 30 e il 10 per cento.

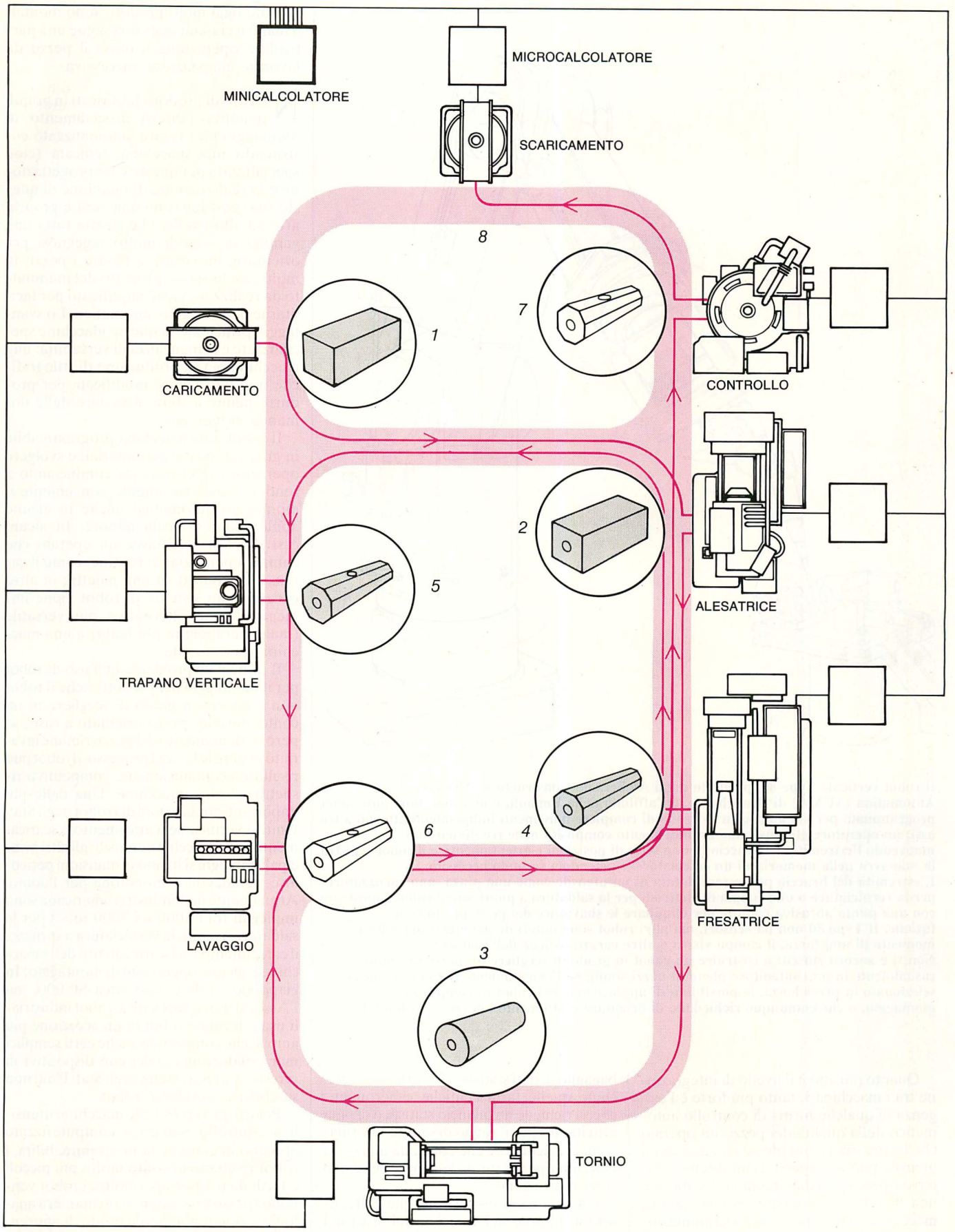
7a



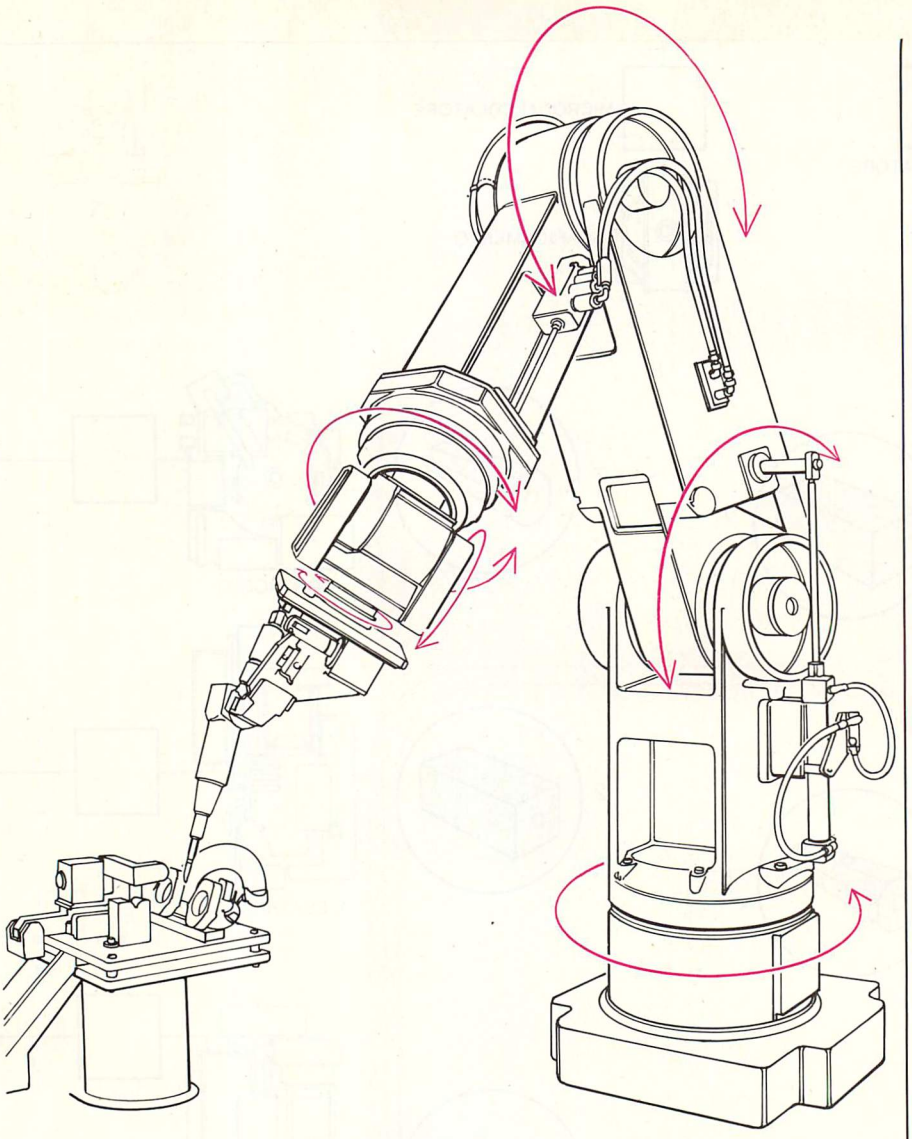
7b



I motori a turbina sono installati in seguito. Uno dei vantaggi della simulazione al calcolatore del montaggio è che il progettista può determinare a occhio se i componenti si adattano l'uno all'altro. Le fotografie di questa pagina e della precedente sono state riprese alla McDonnell Douglas di St. Louis.



Un sistema produttivo flessibile è un complesso automatizzato di macchine utensili programmabili per lavorazioni metalliche: le macchine sono controllate da una gerarchia di calcolatori e collegate da un nastro che trasporta i pezzi da lavorare. Il minicalcolatore determina la successione generale delle lavorazioni; quando un pezzo arriva alla macchina, le fa scegliere l'utensile da taglio appropriato e «cala» il programma in un microcalcolatore più piccolo che controlla il percorso di taglio dell'utensile. Oggi esistono sistemi produttivi flessibili capaci di funzionare per ore senza intervento esterno: i pezzi da lavorare vengono caricati all'ingresso del sistema nel primo turno di lavoro, e quindi il sistema procede autonomamente per il secondo e terzo turno.



Il robot verticale Type 80, prodotto dagli Ateliers de Constructions Mécaniques et Automation (ACMA) di Beauchamp, un'affiliata della Renault, è una macchina autonoma programmata per via analogica in grado di compiere movimenti indipendenti attorno a tre assi; un operatore gli «insegna» un movimento composito nelle tre dimensioni muovendo l'estremità del braccio in una serie di posizioni e orientamenti, e il robot registra la manovra nella memoria di un calcolatore, ripetendola secondo necessità. L'estremità del braccio può essere dotata di un utensile come una pinza, uno spruzzatore per la verniciatura o una coppia di elettrodi per la saldatura a punti; qui il robot è mostrato con una punta abrasiva rotante per eliminare le sbavature dei pezzi prodotti per fusione. Il Type 80 non ha sensori, ma altri robot sono dotati di strumenti per rilevare il momento di una forza, il campo visivo o altre caratteristiche dell'ambiente. Non si è ancora riusciti a costruire un robot in grado di scegliere un pezzo orientato casualmente in un contenitore pieno di pezzi simili; se l'orientamento del pezzo non viene selezionato in precedenza, le possibilità di applicazione del robot in compiti di montaggio, o che comunque richiedano di orientare esattamente i pezzi, sono limitate.

Quanto più alto è il livello di integrazione tra i macchinari, tanto più forte è l'esigenza di qualche forma di controllo automatico della qualità dei pezzi: un operaio che lavora manualmente su una macchina utensile può accorgersi di un difetto e interrompere immediatamente il lavoro, ma una macchina autonoma, per un guasto meccanico o un errore di programmazione, potrebbe danneggiare gravemente un'intera partita di pezzi. Per accettare o scartare i singoli pezzi si possono sfruttare i dati forniti da diversi tipi di sensori applicati alle macchine; queste informazioni possono anche servire per accumulare un bagaglio di dati statistici. In certe industrie, come quelle farmaceutiche e aeronautiche, si richiede un bilancio statistico di ogni attività; inoltre il rinvio di queste informazioni al calcolatore che controlla una certa macchina permette di regolarla nel corso della lavorazione.

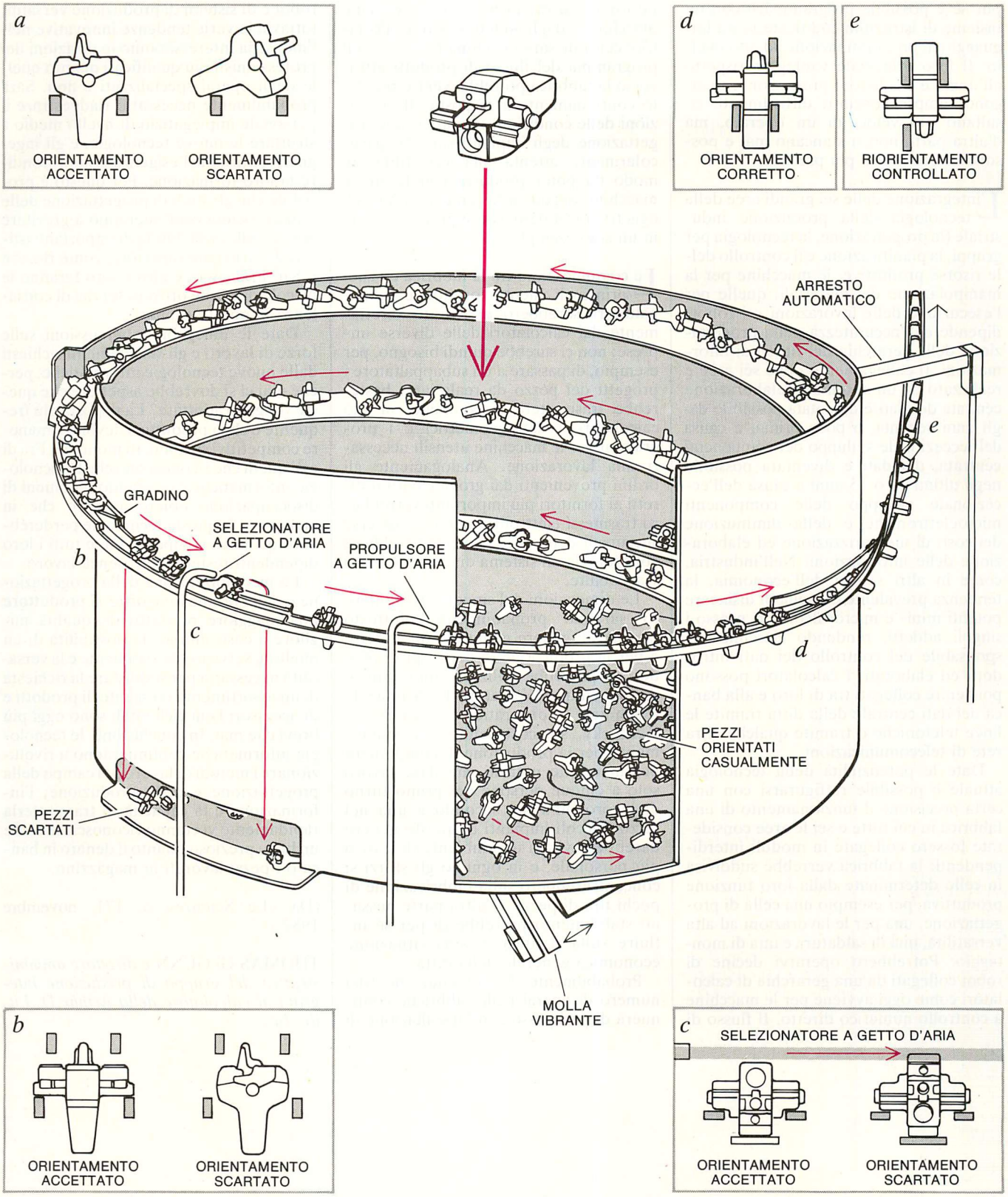
Un sistema di produzione che è diventato il simbolo del lavoro in fabbrica nel suo complesso è la catena di montaggio: bisogna però osservare che la catena di montaggio non è necessariamente un sistema meccanizzato, ma un metodo di organizzazione del lavoro applicabile tanto agli uomini quanto alle macchine. Ancora oggi molti prodotti sono montati a mano e ciascun operaio esegue una particolare operazione e passa il pezzo da lavorare alla stazione successiva.

Nel caso di prodotti fabbricati in grandi quantità l'intero procedimento di montaggio può venire automatizzato costruendo una macchina dedicata (cioè specializzata per questo). La progettazione e la realizzazione di macchine di questo tipo costituiscono una vera e propria arte ad alto livello, che sfrutta tutta una gamma di metodi molto ingegnosi per orientare, incastrare e fissare i pezzi; in molti casi lo stesso progetto del manufatto da realizzare viene modificato per facilitarne il montaggio automatico. Lo svantaggio principale di queste macchine specializzate è la mancanza di versatilità: una macchina per la produzione di stilografiche non può venire modificata per produrre penne a sfera al mutare delle domande di mercato.

Il robot, una macchina programmabile in grado di trasferire materiali e svolgere operazioni ripetitive, sta cominciando a rendere economicamente conveniente il montaggio automatico anche in alcune applicazioni su scala minore. In alcuni casi il robot sostituisce un operaio che compie operazioni di routine, come il carico dei prodotti su una paletta; in altre occasioni un sistema di robot viene impiegato come alternativa più versatile (ma generalmente più lenta) a una macchina specializzata.

Il principale problema nell'uso di robot per il montaggio dei prodotti è che il robot non è ancora in grado di scegliere in un contenitore un pezzo orientato a caso; se però l'orientamento del pezzo rimane invariato in tutte le fasi del processo, il robot può risultare economicamente competitivo rispetto ad altre macchine. Una delle più importanti applicazioni dei robot negli Stati Uniti si verifica nel caricamento e scaricamento delle macchine utensili; gli altri principali impieghi si hanno in mansioni pericolose, sgradevoli o monotone per l'uomo. Attualmente nell'industria americana sono impiegati tra i 5000 e i 7000 robot per la saldatura a punti, la verniciatura a spruzzo, il caricamento e lo scaricamento delle macchine e alcune operazioni di montaggio; In giappone i robot sono circa 80 000, ma l'Associazione giapponese robot industriali usa il termine robot in un'accezione più ampia, che comprende anche certi semplici manipolatori meccanici con dispositivi di arresto automatico che negli Stati Uniti non sarebbero considerati robot.

Per quanto i robot e le macchine utensili a controllo numerico computerizzato abbiano in comune la programmabilità, i robot risultano di solito molto più piccoli e facili da trasportare; inoltre i robot vengono spesso programmati in maniera analogica, cioè regolando il modo di apprendimento della macchina e muovendo il braccio meccanico esattamente come richiesto per eseguire l'operazione. Perciò numerosi robot funzionano in pratica come dispositivi di registrazione e riproduzione che simulano movimenti umani,



Il corretto orientamento dei pezzi è essenziale per le operazioni di montaggio automatico, ma è una delle fasi più difficili da meccanizzare. Per pezzi piccoli e leggeri, un alimentatore vibrante può fare ciò che per il robot è impossibile: scartare tutti i possibili orientamenti di un pezzo tranne quello necessario per il montaggio automatico. Nell'illustrazione un contenitore di interruttori a levetta orientati casualmente è montato su un sistema di molle e vibra verticalmente 60-120 volte al secondo; le vibrazioni gli imprimono una rotazione grazie alla quale gli interruttori avanzano su una rampa a spirale lungo la parete interna del contenitore. Alla sommità di questo la rampa termina in una pista a due binari, da cui i pezzi o ricadono nel contenitore o procedono tra i binari con la levetta rivolta verso il basso.

Dato che solo uno dei quattro orientamenti possibili è accettabile, gli interruttori sono selezionati in due stazioni lungo la pista: alla prima scendono una serie di gradini e le vibrazioni fanno cadere nel contenitore i pezzi orientati in due dei quattro modi; alla seconda gli ultimi interruttori male orientati sono respinti nel contenitore da un getto d'aria. L'apparecchio può fornire alle macchine per il montaggio 2400 pezzi correttamente orientati all'ora. Si possono costruire alimentatori vibranti quasi per ogni tipo di pezzo, ma l'usura delle parti vibranti rende impraticabile un sistema di questo genere per pezzi di lunghezza superiore a circa 15 centimetri o di peso superiore a circa 250 grammi. La macchina qui raffigurata è prodotta dalla Bodine Corporation di Bridgeport, nel Connecticut.

pur se è possibile programmarli con un insieme di istruzioni codificate in un linguaggio di programmazione ad alto livello. Il loro principale vantaggio rispetto all'uomo è che le loro prestazioni rimangono sempre costanti; difficilmente risultano più veloci di un operaio, ma d'altra parte non si stancano mai e possono essere molto più precisi.

L'integrazione delle sei grandi aree della tecnologia della produzione industriale (la progettazione, la tecnologia per gruppi, la pianificazione e il controllo delle risorse produttive, le macchine per la manipolazione dei materiali, quelle per l'esecuzione delle lavorazioni e i robot) dipende dall'accuratezza nella progettazione della gerarchia del flusso di informazioni. Il collegamento delle sei aree è realizzato da un sistema di elaborazione centrata dei dati è diventata possibile dagli anni settanta, o poco prima, a causa dell'eccezionale sviluppo dei componenti centrata, dei dati è diventata possibile negli ultimi 10 o 15 anni a causa dell'eccezionale sviluppo delle componenti microelettroniche e della diminuzione dei costi di memorizzazione ed elaborazione delle informazioni. Nell'industria, come in altri settori dell'economia, la tendenza prevalente è quella di dislocare potenti mini- e microcalcolatori presso i singoli addetti, rendendo ciascuno responsabile del controllo dei dati introdotti ed elaborati. I calcolatori possono poi venire collegati tra di loro e alla banca dei dati centrale della ditta tramite le linee telefoniche o tramite qualche altra rete di telecomunicazioni.

Date le potenzialità della tecnologia attuale è possibile raffigurarsi con una certa precisione il funzionamento di una fabbrica in cui tutte e sei le aree considerate fossero collegate in moduli interdipendenti: la fabbrica verrebbe suddivisa in celle determinate dalla loro funzione produttiva, per esempio una cella di progettazione, una per le lavorazioni ad alta versatilità, una di saldatura e una di montaggio. Potrebbero operarvi decine di robot collegati da una gerarchia di calcolatori come oggi avviene per le macchine a controllo numerico diretto. Il flusso di informazioni di ritorno dai robot, dalle macchine e dagli addetti verso il calcolatore centrale sarebbe immediato, e così il programma del flusso di prodotti attraverso la fabbrica potrebbe venire regolato continuamente in risposta alle variazioni delle condizioni operative. La progettazione degli impianti sarebbe particolarmente attenta alla versatilità, in modo da poter produrre con le stesse macchine oggetti differenti; al limite gli oggetti potrebbero essere prodotti anche in un solo esemplare.

Le comunicazioni tra la fabbrica e i suoi principali clienti, fornitori e subappaltatori sarebbero assicurate direttamente dai calcolatori delle diverse imprese; non ci sarebbe quindi bisogno, per esempio, di passare a un subappaltatore i progetti del pezzo da realizzare: basterebbe trasmettere direttamente al suo calcolatore i dati geometrici e i programmi per le macchine utensili necessari alla lavorazione. Analogamente gli ordini provenienti dai grossi clienti o diretti ai fornitori più importanti verrebbero trasmessi elettronicamente; le diverse succursali della stessa società sarebbero collegate da un sistema di comunicazioni via satellite.

Le dimensioni del singolo stabilimento saranno probabilmente piuttosto piccole: in genere meno di 500 addetti, e per la produzione di certi tipi di prodotti si potrebbe utilizzare un organico di solo cinque lavoratori. La Yamazaki Machinery Corporation di Florence, Kentucky, sta costruendo uno stabilimento per la produzione di componenti per macchine utensili che darà lavoro solo a cinque persone nel primo turno di lavoro, una nel secondo e una nel terzo. Piccoli impianti di questo genere darebbero vita a un ambiente di lavoro più personale, e in ognuno gli sforzi si concentrerebbero sulla fabbricazione di pochi tipi di pezzi. D'altra parte nessuno stabilimento potrebbe di per sé influire sulla politica o sulla situazione economica generale della ditta.

Probabilmente la diminuzione del numero di operai nelle fabbriche continuerà di pari passo con l'installazione di robot e di sistemi di produzione versatili; tuttavia le varie tendenze innovative nell'industria interesseranno le posizioni dei professionisti più qualificati quanto quelle degli operai specializzati e non. Sarà probabilmente necessario riaddestrare il personale impiegatizio di livello medio a sfruttare le nuove tecnologie, e gli ingegneri sentiranno l'esigenza di approfondire la loro formazione. Per questo è probabile che gli studi di progettazione delle grandi società continueranno a gravitare attorno alle città dotate di importanti istituti di istruzione superiore, come Boston e San Francisco, e altrettanto faranno le piccole ditte che offrono servizi di consulenza in questo campo.

Date le innegabili ripercussioni sulle forze di lavoro e gli stanziamenti richiesti dalle nuove tecnologie informatiche, perché mai ci si dovrebbe aspettare che queste vengano adottate? La risposta più frequente è che i produttori devono rimanere competitivi sui mercati mondiali. Fra di essi quelli che riconoscono che le tecnologie informatiche causeranno fenomeni di disoccupazione obiettano però che in mancanza di queste tecnologie perderebbero qualsiasi competitività, e tutti i loro dipendenti resterebbero senza lavoro.

La meccanizzazione della progettazione e della produzione offre al produttore una maggiore produttività, qualità migliore a costi minori, la possibilità di un migliore servizio verso il cliente e la versatilità necessaria per soddisfare la richiesta di un assortimento crescente di prodotti e di accessori i cui cicli vitali sono oggi più brevi che mai. In conclusione, le tecnologie informatiche continueranno a rivoluzionare i metodi di lavoro nel campo della progettazione e della produzione; l'informazione e la capacità di trasmetterla rapidamente verranno riconosciute come un bene prezioso quanto il denaro in banca o i pezzi lavorati in magazzino.

(Da «Le Scienze» n. 171, novembre 1982.)

THOMAS G. GUNN *è direttore amministrativo del gruppo di produzione integrata al calcolatore della Arthur D. Little, Inc.*.

Calcolatori e reti nell'azienda

di Thomas W. Malone
John F. Rockart

La creazione di nuovi ambiti di mercato e di una diversa concezione della competitività condurrà in futuro alla ristrutturazione dell'organizzazione aziendale

Circa 150 anni fa, in Europa e negli Stati Uniti l'economia iniziò a subire una trasformazione più profonda di qualsiasi altra verificatasi dal Medioevo in poi: la Rivoluzione industriale. Oggi le economie industriali si trovano nelle prime fasi di un'altra trasformazione che finirà forse per assumere un ruolo altrettanto significativo.

C'è però una differenza fondamentale; la rivoluzione del secolo scorso era guidata da trasformazioni nell'economia della produzione e dei trasporti, mentre a spingere quella che si avvia oggi non saranno mutamenti di produzione, ma di coordinamento. Ogni volta che più persone collaborano nasce la necessità di comunicare, decidere, assegnare risorse e far giungere i prodotti e i servizi giusti nel luogo e al momento giusti. Dirigenti, impiegati, negozianti e acquirenti, mediatori e contabili, quasi tutti coloro che lavorano, in realtà, devono svolgere attività di coordinamento.

È proprio in queste attività a forte contenuto informativo che le tecnologie informatiche trovano alcuni tra i loro impieghi più importanti e produrranno gli effetti più profondi. Riducendo drasticamente i costi di coordinamento e migliorandone rapidità e qualità queste nuove tecnologie permetteranno di svolgere attività di coordinamento molto più ampie ed efficaci e di formare quindi nuove strutture operative ad alta intensità coordinativa.

Al cuore delle nuove tecnologie c'è il calcolatore in rete. La parola stessa, «calcolatore», evidenzia l'abituale accezione di «macchina per calcolare», fatta cioè per ricevere dati, elaborarli e fornire risultati. Questa immagine del calcolo automatico non coglie però l'essenza dell'uso attuale degli elaboratori elettronici, e di quello che ne sarà l'impiego futuro. Molti dei più importanti impieghi attuali dei calcolatori riguardano attività di coordinamento, come il controllo di ordini, scorte e contabilità. Inoltre con l'aumentare dei collegamenti tra queste macchine si scopriranno molti altri modi di organizzarne il lavoro. I calcolatori, quindi, in futuro, potranno essere ricordati non come tecnologia utilizzata principalmente per il calcolo, ma come tecnologia per il coordinamento.

Per capire che cosa potrebbe succedere con il perfezionamento della tecnologia informatica e la diminuzione dei costi, si consideri l'analogia con la tecnologia dei trasporti. Il suo effetto primario è stato la semplice sostituzione delle tecnologie di trasporto vecchie con quelle nuove: treno e automobile al posto del cavallo e dei carri a trazione animale.

Con il procedere dei miglioramenti, la tecnologia dei trasporti non venne più usata soltanto per sostituire le forme di trasporto precedenti; si ebbe infatti un'importante conseguenza: l'aumento del numero di viaggi. Gli spostamenti tra casa e posto di lavoro si fecero più lunghi, gli interventi a convegni lontani e le visite ad amici e parenti più frequenti.

Poi, al crescere dell'uso dei trasporti, finì per emergere un terzo effetto: la comparsa di nuove strutture sociali ed economiche «a uso intensivo di trasporto». Queste strutture, come i quartieri periferici delle città e gli ipermercati, non sarebbero state possibili senza una vasta disponibilità di forme di trasporto comode ed economiche.

Il miglioramento della tecnologia del coordinamento ha effetti analoghi. Un effetto primario della riduzione dei costi di coordinamento è la sostituzione del coordinamento umano con la tecnologia informatica: i sistemi di elaborazione dati hanno contribuito, per esempio, ad allontanare migliaia di impiegati da uffici di assicurazioni e banche e a sostituire gli addetti allo smistamento e all'inoltro nelle fabbriche. Oggi i calcolatori garantiscono il controllo di priorità dei compiti, indicandone i più critici su ogni stazione di lavoro. Più in generale, la vecchia previsione secondo la quale i calcolatori avrebbero portato alla scomparsa dei ruoli direttivi intermedi sembra sul punto di avverarsi: negli anni ottanta molte società hanno appiattito la propria gerarchia dirigenziale eliminando alcuni livelli intermedi.

Un effetto secondario della riduzione dei costi di coordinamento è l'aumento della quantità totale di coordinamento impiegata. I sistemi attuali di prenotazione degli aerei consentono alle agenzie di viaggio di prendere in considerazione con facilità più possibilità di volo per un cliente, favorendo così il moltiplicarsi di tariffe speciali e sconti. La American Airlines e la United Air Lines, che dispongono dei sistemi più potenti, traggono notevoli profitti dalle tariffe che i clienti pagano per il servizio. Nel 1988, per esempio, grazie al sistema di prenotazione la American Airlines ha ricavato 134 milioni di dollari, quasi il 15 per cento delle sue entrate totali. Inoltre la disponibilità di informazioni aggiornate all'istante sulle vendite di biglietti di tutte le compagnie aeree consente all'American e alla United di modificare i prezzi in modo da massimizzare i profitti.

Anche la Otis Elevator Company ha aumentato il coordinamento, soprattutto per migliorare il servizio ai clienti nel settore della manutenzione. Con il sistema Otisline, operatori specializzati ricevono le segnalazioni dei guasti telefonicamente, tramite un numero verde nazionale, registrano il problema su una base di dati e poi smistano gli addetti presenti nelle varie zone per mezzo di un sistema elettronico.

Questa disponibilità di dati «in tempo reale» ha migliorato notevolmente la gestione delle attività di riparazione: per esempio, se un certo tipo di componente si è guastato durante l'ultima settimana in otto ascensori su 100, la Otis può sostituirlo in via preventiva sugli altri 92. Benché questo tipo di correlazione dei dati a livello nazionale fosse possibile anche prima, il grado di comunicazione e di coordinamento necessario non

era ancora raggiungibile. L'acquisizione di queste capacità è stata uno dei fattori che hanno permesso di ridurre le richieste di manutenzione del 20 per cento.

In alcuni casi l'effetto secondario di un aumento della domanda può sommergere completamente quello primario di sostituzione. In un caso da noi studiato, per esempio, un sistema per teleconferenze era servito a rimuovere un livello intermedio di dirigenti, ma riesaminando la situazione diversi anni dopo si è scoperto che era stato creato un numero quasi uguale di posti (per figure professionali diverse, ma allo stesso livello gerarchico). In accordo con la società i nuovi specialisti intraprendevano progetti prima mai presi in considerazione: evidentemente le risorse manageriali non più impegnate per la sola comunicazione hanno trovato impiego in compiti di coordinamento più complessi.

Un altro effetto della riduzione dei costi di coordinamento è una tendenza all'adozione di strutture con maggior contenuto coordinativo. Un esempio tipico è quello della società Frito-Lay, studiata da Lynda M. Applegate della Harvard Business School e altri. Alla Frito-Lay ben 10 000 rappresentanti registrano su calcolatori tascabili tutte le vendite di 200 prodotti nel settore ortofrutticolo dopo la consegna ai clienti. Ogni notte le informazioni raccolte vengono trasmesse al calcolatore centrale, che a sua volta invia i dati sulle variazioni di prezzo e le offerte speciali per il giorno dopo. Ogni settimana il calcolatore centrale ricapitola le informazioni e le confronta con i dati esterni riguardanti la concorrenza. I risultati sono accessibili a una quarantina di alti dirigenti tramite uno speciale sistema informatico (EIS, *executive information system*).

L'accesso a questi dati ha consentito alla Frito-Lay di trasferire la responsabilità di alcune decisioni strategiche lungo la gerarchia, dal quartier generale a quattro capi area e a diverse decine di responsabili di zona. Questi dirigenti usano i dati non solo per confrontare i risultati con gli obiettivi, ma anche per consigliare variazioni di strategia ai responsabili centrali. Questa struttura ad alta densità di coordinamento è diventata possibile solo di recente grazie all'aumento di potenza e alla diminuzione di costo dei calcolatori tascabili, dei pacchetti EIS, dei cicli di elaborazione e degli impianti per telecomunicazioni.

Le nuove strutture ad alta intensità di coordinamento non si limitano a collegare persone di una stessa società; molte prevedono anzi legami tra società diverse. L'industria tessile statunitense, per esempio, ha cominciato ad allestire una serie di collegamenti informatici tra società nel quadro del programma Quick Response (risposta rapida). Come è stato descritto da Janice H. Hammond della Harvard Business School e da altri, questi collegamenti investono società lungo tutta la catena di produzione, dai fornitori di fibre (lana, cotone e simili) agli stabilimenti di tessitura, a quelli di cucitura, fino ai punti di vendita.

Una volta completate, queste reti aiuteranno le società a rispondere con prontezza alla domanda. Al momento della vendita di un maglione a New York, per esempio, la registrazione dell'etichetta tramite un lettore di codici a barre potrebbe attivare automaticamente le funzioni di ordinazione, consegna e produzione lungo tutta la catena fino al magazzino di lane situato nel South Carolina. Questa nuova struttura pluriorganizzativa ridurrà i costi d'inventario lungo tutta la catena produttiva. Negli Stati Uniti l'industria della distribuzione al dettaglio di tessuti e abbigliamento spende in costi di inventario circa 25 miliardi di dollari all'anno; l'adozione del sistema Quick Response potrebbe farne risparmiare metà.

La Wal-Mart, una organizzazione di grande distribuzione, ha già realizzato alcune componenti di un sistema simile che collega ciascun venditore al dettaglio con la Procter & Gamble e vari altri suoi fornitori principali. Così facendo la Wal-Mart ha potuto rimuovere gran parte dei propri addetti agli acquisti concordando con i fornitori il rimpiazzo dei prodotti. In un esperimento di questo tipo sia le vendite unitarie sia il rinnovo delle scorte sono cresciuti del 30 per cento.

A volte la tecnologia aiuta a creare reti interaziendali, e non solo tra fornitori e

Il centro prenotazioni della Rosenbluth Travel a Filadelfia invia le informazioni sui viaggi a un ufficio centrale che coordina l'attività delle altre agenzie in tutto il mondo. Le informazioni sulla domanda sono subito disponibili, permettendo alle società collegate di gestire prenotazioni e biglietti in modo più efficiente di quanto sarebbe possibile alle singole agenzie.

acquirenti ma anche tra concorrenti potenziali. Eric K. Clemons dell'Università della Pennsylvania ha studiato per esempio la Rosenbluth International Alliance, un consorzio internazionale di agenzie di viaggio che mettono in comune i dati, i servizi e il software per la gestione dei clienti. Il gruppo garantisce anche un servizio di assistenza telefonica gratuita in inglese nei paesi più importanti. Questo consorzio di agenzie indipendenti, alla guida del quale si trova la Rosenbluth Travel di Filadelfia, è quindi in grado di gestire tutti i servizi di organizzazione dei viaggi internazionali e degli incontri tra clienti provenienti da ogni parte del mondo.

Le industrie tessili della zona di Prato rappresentano un esempio analogo di alleanza interorganizzativa. Secondo la descrizione di Michael J. Piore e Charles F. Sabel del Massachusetts Institute of Technology l'attività di alcuni grandi stabilimenti tessili è stata frazionata in un gran numero di piccole ditte, coordinate in parte da collegamenti informatici. Questa rete riesce ad adattarsi in maniera flessibile alle variazioni della domanda, trasferendo a volte gli ordini da una fabbrica sovraccarica ad un'altra con capacità ancora disponibile. La struttura trae inoltre vantaggio dalle motivazioni imprenditoriali dei proprietari: in fabbriche piccole il profitto dei proprietari è più legato al loro impegno personale che in quelle più grandi.

Come mostrano questi esempi, l'informatica sta facilitando già oggi la comparsa di nuove strutture ad alta intensità di coordinamento. Che cosa significano questi cambiamenti per le organizzazioni del prossimo futuro?

Un risultato sorprendente della nostra ricerca è la previsione che l'impiego dell'informatica per coordinare l'attività economica possa condurre a un passaggio complessivo da una sorta di autarchia aziendale al ricorso al mercato. Per rendersi conto del perché, si consideri che ogni organizzazione deve scegliere tra produrre i beni e i servizi di cui ha bisogno o acquistarli all'esterno. La General Motors, per esempio, deve decidere se è più conveniente produrre pneumatici in proprio oppure acquistarli da un fornitore esterno.

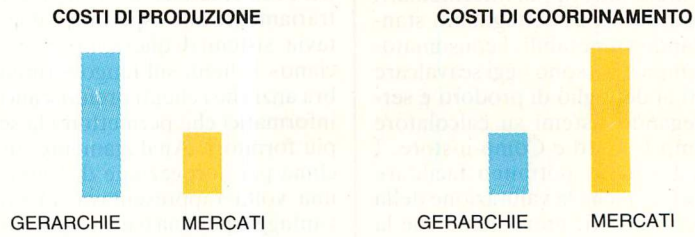
Ciascuna di queste due forme di coordinamento, interna ed esterna, presenta vantaggi e svantaggi; come hanno affermato Oliver Williamson dell'Università della California a Berkeley e altri, acquistare beni da un fornitore esterno anziché produrli in proprio richiede spesso un coordinamento maggiore. Per acquistare pneumatici la General Motors dovrà probabilmente scegliere fra numerosi potenziali fornitori, negoziare i contratti e mantenere una contabilità rigorosa dei trasferimenti di denaro, mentre il coordinamento di una produzione interna spesso avviene in maniera più economica e meno burocratica, con contatti telefonici e qualche riunione.

Ma il miglioramento delle tecnologie informatiche dovrebbe ridurre il costo del coordinamento, sia interno sia esterno, proprio come la tecnologia dei trasporti ha ridotto quello dei viaggi. Quando treni e automobili ridimensionarono le difficoltà del viaggiare, molti scelsero di non vivere in città per godere di maggiori spazi abitativi; analogamente, quando l'informatica riduce i costi di una certa quantità di coordinamento, le società possono decidere di comprare di più e produrre di meno. Il maggior coordinamento necessario per gli acquisti non sarà infatti più così costoso e l'acquisto stesso può presentare certi vantaggi. Quando la General Motors acquista pneumatici, per esempio, può avvalersi delle economie di scala del suo fornitore e al mutare delle esigenze scegliere i migliori pneumatici disponibili in quel momento tra tutti i fornitori. Prevediamo quindi che le reti portino a una diminuzione dell'integrazione verticale, con un privilegio dell'acquisto sulla produzione interna, e alla proliferazione di piccole aziende. Ne deriveranno più alleanze a mediazione informatica (come la Rosenbluth International Alliance) e un aumento dell'impiego dei mercati informatici come ambiente di scelta dei fornitori (come nei sistemi di prenotazione delle compagnie aeree).

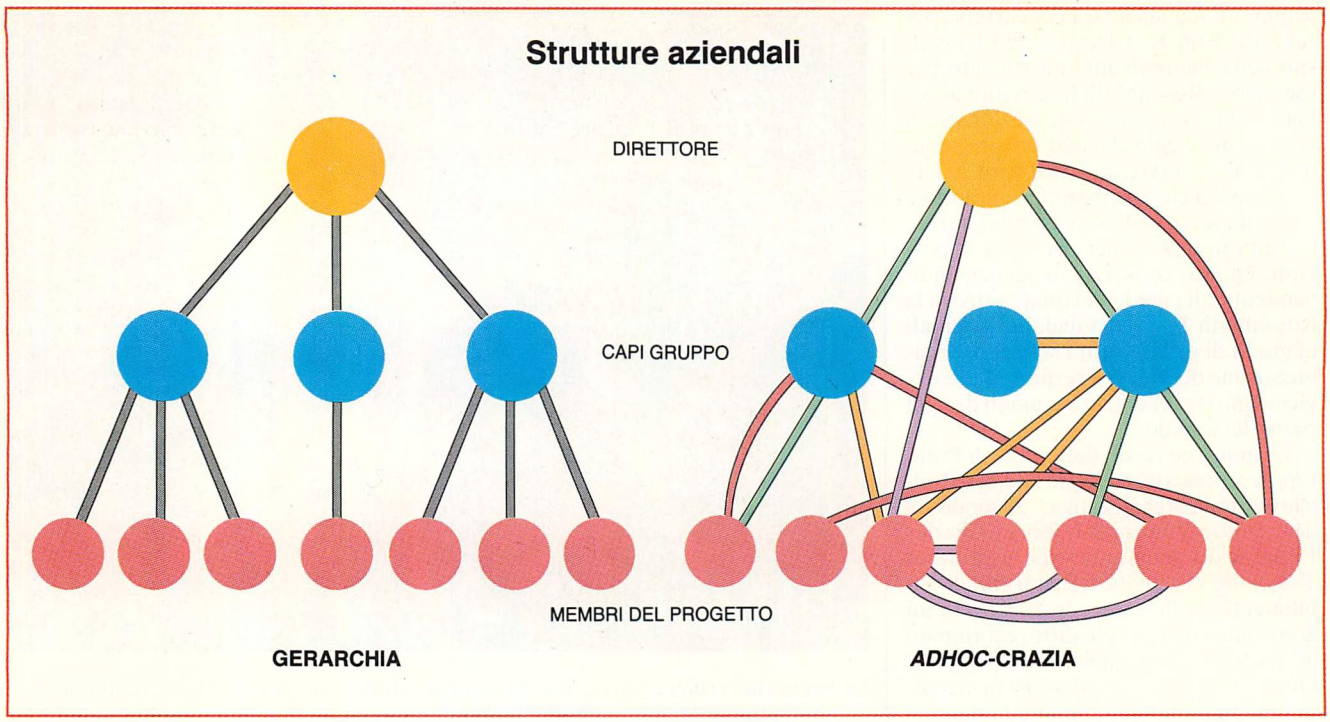
Da questa argomentazione consegue che l'informatica contribuirà a migliorare l'efficienza dei mercati: gli acquirenti non avranno più bisogno di spendere

La lettura dei codici a barre, uno dei componenti del programma Quick Response dell'industria tessile americana, fornisce informazioni sul prodotto a ogni componente della catena distributiva, dal fornitore al dettagliante. La rapidità di trasmissione dei dati consente di ridurre le scorte e di adattarsi rapidamente alle fluttuazioni della domanda.

Gerarchie e mercati: i costi a confronto



La produzione di beni in gerarchie a integrazione verticale comporta di solito costi superiori a quelli del loro acquisto sul mercato. Il ricorso a un fornitore esterno permette infatti di sfruttare le economie di scala e altri vantaggi relativi ai costi di produzione. D'altro canto, l'acquisto impone costi di coordinamento maggiori: bisogna individuare il fornitore, negoziare i contratti e tenere la contabilità dei relativi pagamenti.



grandi risorse per confrontare prodotti e prezzi di diversi fornitori; un mercato informatico sarà in grado di raccogliere e distribuire queste informazioni in maniera facile ed economica.

Questi mercati più efficienti rappresentano un pericolo per quelle società che basano il proprio vantaggio strategico sull'inefficienza del mercato. Come ha descritto Clemons, per esempio, quando il London International Stock Exchange, la borsa internazionale di Londra, ha installato un sistema di contrattazione elettronico, la sala delle contrattazioni si è svuotata in poche settimane; le operazioni erano state trasferite su terminali sparsi in tutto il mondo. Il nuovo sistema ha tagliato notevolmente i costi di spostamento di compratori e venditori, una trasformazione che a sua volta ha ridotto drasticamente i profitti dei mediatori e degli agenti di borsa, i quali precedentemente detenevano il monopolio del servizio. Il potenziale calo dei profitti può forse spiegare perché tante altre borse si oppongano alla contrattazione elettronica.

Anche molti altri tipi di intermediari, come i distributori e i dettaglianti, stanno diventando vulnerabili. I consumatori, per esempio, possono oggi scavalcare i venditori al dettaglio di prodotti e servizi impiegando sistemi su calcolatore come Comp-U-Card e Comp-u-store. I mercati informatici potranno facilitare notevolmente anche la valutazione della qualità dei prodotti; prevediamo che la comparsa nelle reti informatiche di abbondanti raccolte di commenti e valutazioni da parte di acquirenti precedenti sia prossima, e con essa la creazione della versione istantanea, in tempo reale, di un servizio per i consumatori.

L'aumento dell'efficienza dei mercati comporta inoltre per le società la necessità di concentrarsi sulle poche competenze di base da cui dipende il loro vantaggio strategico sul mercato, acquistando i prodotti e i servizi accessori da cui dipendono, invece di produrli: la Ford e la Chrysler, per esempio, negli ultimi anni hanno aumentato di molto la percentuale di prodotti acquistati da fornitori esterni, come pneumatici e batterie.

Le tecnologie informatiche possono rivestire un'importanza strategica, ma è raro che un'unica innovazione in questo campo costituisca di per sé un elemento di vantaggio concorrenziale duraturo. L'American Hospital Supply (oggi Baxter Healthcare Corporation), per esempio, si guadagnò l'elogio generale per un sistema innovativo che permetteva ai clienti di effettuare gli ordini tramite calcolatori, senza l'intervento di un rappresentante. Questo sistema rese più facili le ordinazioni presso l'American Hospital che non presso la concorrenza, e ridusse il tempo che i venditori dovevano dedicare agli aspetti burocratici della accettazione di un ordine. Contrariamente alle aspettative iniziali, tuttavia, sistemi di questo tipo non «agganciano» i clienti sul lungo termine. Sembra anzi che i clienti preferiscano sistemi informatici che permettono la scelta tra più fornitori. Analogamente, una macchina per l'erogazione di contante, che una volta rappresentava un fattore di vantaggio per una banca, oggi costituisce in generale una necessità per mantenersi al passo con la concorrenza.

Un modo per mantenere una posizione di vantaggio è quello di rinnovarsi con rapidità sufficiente a lasciare i concorrenti sempre un passo indietro. Un altro sistema, come osserva Clemons, consiste nell'utilizzare la tecnologia dell'informazione per generare qualche altro vantaggio strutturale. La Barclay deZoete Wedd, per esempio, una società di mediazione, continua a trarre vantaggio da un sistema informatico di contrattazione delle azioni, perché da tempo controllava lo scambio di molte più azioni di tutti i suoi concorrenti.

Oltre ai mercati, un'altra struttura organizzativa ad alta intensità di coordinamento che promette di diventare molto più comune è quella che alcuni teorici della gestione chiamano «organizzazione in rete» o, con un termine più estroso, «*adhoc*-crazia» (dalla locuzione latina «ad hoc»), un termine reso famoso da Alvin Toffler nel suo libro *Future Shock*. Si tratta di una forma già comune in organizzazioni come i grandi studi legali, le società di consulenza e gli istituti di ricerca, organizzazioni ed enti che debbono adattarsi continuamente a un insieme variabile di progetti, ciascuno dei quali richiede differenti combinazioni di competenze e risorse. Queste organizzazioni si basano su un gran numero di gruppi di lavoro molto dinamici per progetti specifici, relativamente autonomi e dall'impostazione imprenditoriale, collegati da fitti scambi di informazioni.

L'*adhoc*-crazia si distingue dalla organizzazione attualmente più comune nelle imprese commerciali, cioè la gerarchia. Le gerarchie sono comuni anche perché costituiscono un sistema molto economico per coordinare un grande numero di persone. In linea di principio in una gerarchia chi decide può prendere in considerazione tutte le informazioni note a un qualsiasi membro del gruppo, con molta meno comunicazione di quella che sarebbe necessaria se ciascuno comunicasse con tutti gli altri.

In pratica, però, le gerarchie presentano limiti significativi; coloro che hanno poteri decisionali possono trovarsi sovraccaricati e quindi risultare incapaci di reagire in maniera efficace a un ambiente che cambi rapidamente, o di prendere in esame informazioni sufficienti a risolvere un problema complesso. Inoltre chi si trova alla base della struttura può sentirsi escluso dal processo decisionale e risultare di conseguenza meno motivato a contribuire col proprio impegno.

Con la riduzione dei costi delle comunicazioni, le strutture non gerarchiche, come i mercati e le *adhoc*-crazie, contribuiranno forse al superamento delle carenze delle gerarchie. L'*adhoc*-crazia, per esempio, a causa della grande ricchezza di comunicazione trasversale imprevedibile, possiede un'altissima intensità di coordinamento. Nuovi mezzi di comunicazione come la posta elettronica, le teleconferenze e i bollettini elettronici possono facilitare il coordinamento e quindi consentire all'*adhoc*-crazia di lavorare con efficienza molto maggiore; le reti di calcolatori possono aiutare a individuare e a coordinare persone con competenze diverse nei vari punti dell'organizzazione.

Inoltre le tecnologie che si basano sui calcolatori possono far trasferire le informazioni in modo non solo più rapido ed economico, ma anche più selettivo, una qualità che contribuisce a ridurre il sovraccarico di informazioni. Oggi esistono sistemi per riconoscere, filtrare e ordinare la posta elettronica personale in funzione dell'argomento, del mittente e di altre caratteristiche. Nel loro complesso queste nuove tecnologie del coordinamento possono accelerare il «metabolismo» dell'informazione all'interno di un'organizzazione, cioè la velocità con cui essa può assumere, trasferire, smaltire i dati e rispondere.

L'abbondanza di informazioni può creare difficoltà relative all'esercizio del potere in una organizzazione. Alcuni temono che i dirigenti si trasformino in «Grandi Fratelli» orwelliani, usando le informazioni per esercitare un controllo centrale più severo sui sottoposti. Altri temono che decentrando il potere in tutta l'organizzazione i dipendenti possano utilizzarlo per i propri interessi, dando vita a un caos organizzativo.

Di fatto finora nessuno di questi fenomeni si è realizzato. Sembra invece che stia succedendo qualcosa di diverso: una combinazione paradossale di accentramento e decentramento. Dato che le informazioni sono più facilmente accessibili, i membri dei livelli più bassi dell'organizzazione possono risultare abbastanza informati da prendere più decisioni con maggiore efficienza, mentre contemporaneamente gli alti dirigenti riescono a verificare più facilmente le decisioni prese ai livelli inferiori. Dato quindi che chi decide ai livelli inferiori sa di essere passibile di controlli casuali, i dirigenti superiori riescono a conservare o anche ad aumentare il proprio controllo sulle decisioni.

I cambiamenti avvenuti alla Phillips Petroleum servono a illustrare il fenomeno. In precedenza i massimi dirigenti erano incaricati di decidere i prezzi da assegnare ai prodotti petroliferi, decisioni critiche che dipendevano dai consigli di alcuni analisti, qualificati come impiegati di livello gerarchico più basso. Quando la società ha adottato un sistema informatico dirigenziale, si sono cominciate a prendere alcune decisioni in maniera più diretta basandosi sulle informazioni globali fornite dal sistema. Presto, però, i dirigenti si sono resi conto della possibilità di passare queste informazioni globali direttamente ai responsabili dei terminali locali, che in più potevano prendere in considerazione anche altre informazioni come i prezzi della concorrenza. Decentrando in questo modo le decisioni sui prezzi, la società è riuscita ad adottare strategie di mercato più valide e redditizie nelle diverse regioni degli Stati Uniti.

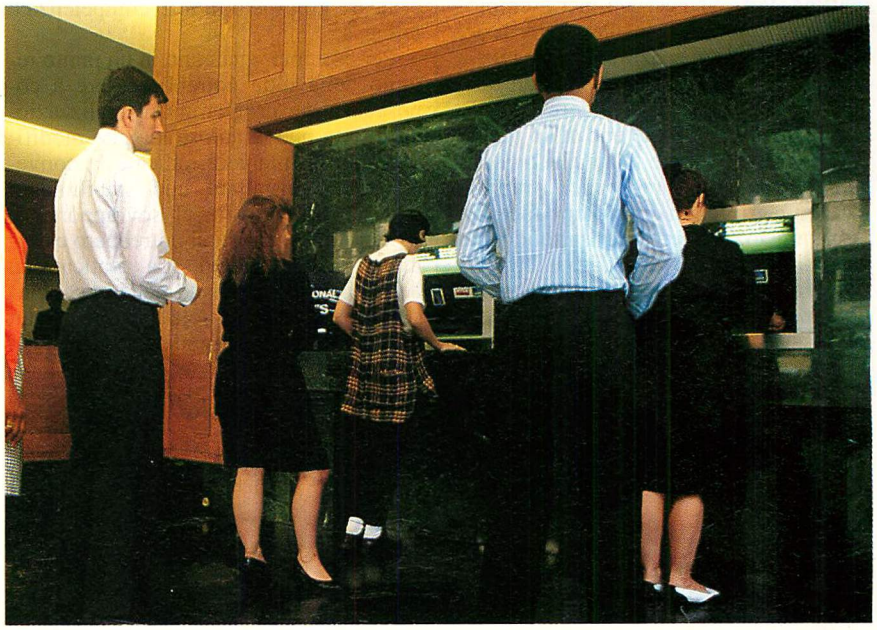
Un altro modo per interpretare questo effetto paradossale è quello di rendersi conto che le nuove tecnologie non si limitano a ridistribuire il potere, ma possono dare a ciascuno un maggior senso di potere. Oggi, per esempio, gli agenti di varie compagnie di assicurazioni visitano i clienti portandosi dietro un calcolatore portatile. Il calcolatore serve per compilare le richieste e valutare premi e risarcimenti. Di solito, però, gli assicuratori, in sede, impiegano parecchie settimane per riesaminare le pratiche ed emettere le nuove polizze.

Presto quindi le regole per la sottoscrizione delle polizze più frequenti verranno inserite nel calcolatore portatile stesso; l'agente avrà perciò la facoltà di emettere immediatamente la polizza a casa del cliente.

Questi sistemi aumentano non solo il «potere» dell'agente, che può controllare il momento e il luogo in cui decidere di emettere la polizza e fare il contratto, ma anche l'autorità dell'assicuratore centrale, perché le regole da lui stabilite verranno applicate senza eccezioni. Gli assicuratori riusciranno anche a dedicare più tempo all'analisi di casi interessanti, e potenzialmente più redditizi, al di fuori della casistica abituale.

Le tecnologie informatiche non influiscono solo sul potere, ma anche sul tempo. Da una parte, infatti, il tempo si è espanso; la posta elettronica, la posta per i messaggi in voce e la trasmissione via fax permettono di inviare o ricevere messaggi a qualsiasi ora del giorno e della notte, quasi ovunque nel mondo. Analogamente i clienti degli sportelli bancari automatici e di alcuni mercati azionari possono compiere transazioni ventiquattro ore su ventiquattro. Il concetto di giornata lavorativa è oggi molto meno significativo e le aziende possono competere anche espandendo gli orari di disponibilità dei loro servizi.

Da un'altra parte, invece, il tempo si è contratto; la concorrenza è possibile anche sul terreno della velocità. Un coordinamento efficiente, per esempio, può ridurre il tempo necessario per sviluppare nuovi prodotti, evadere ordini o rispondere alle richieste dei clienti. Nei gruppi di dirigenti, come quello della Phillips Petroleum, la disponibilità delle informazioni si estende a tutta la gerarchia, permettendo di reagire molto più velocemente alle condizioni del merca-



Gli sportelli automatici per l'erogazione di contante, celebrati alla loro comparsa, oggi sono più che altro una necessità per affrontare la concorrenza. È difficile che innovazioni informatiche isolate offrano un vantaggio concorrenziale duraturo; per mantenersi competitive le aziende devono continuare a rinnovarsi per restare un passo più avanti della concorrenza oppure usare la tecnologia esistente per offrire qualche altro servizio.

to. Oggi è possibile prendere in poche ore o minuti decisioni che in passato avrebbero richiesto anche diversi giorni.

Le trasformazioni discusse fin qui non richiedono particolari doti di preveggenza, poiché sono già in corso. Ma che cosa succederà quando le tecnologie informatiche miglioreranno ancora? Quali altre forme di organizzazione potranno emergere in quel mondo collegato a livello globale creato da queste tecnologie?

Una possibilità è la crescita di importanza delle cosiddette «reti di risposta», reti di esperti disponibili per rispondere a domande in vari campi. A questi servizi ci si potrebbe rivolgere con domande quali: «Quante saponette si sono vendute in Guatemala l'anno scorso?» o «Quali sono le prospettive della superconduttività a temperatura ambiente per la produzione di beni di consumo entro il 1995?». Questi servizi sarebbero dotati di grandi basi di dati e di vari livelli di specialisti in vari settori. Ad alcune domande si potrebbe rispondere facilmente tramite le informazioni delle basi di dati; altre verrebbero rinviate a esperti progressivamente più competenti. La risposta, in relazione alla disponibilità economica e all'urgenza del cliente, potrebbe andare da un ritaglio di giornale a una comunicazione personale di un premio Nobel. Servizi simili esistono anche oggi ma in forma limitata, per esempio i servizi telefonici di assistenza tecnica su un prodotto e quelli di ricerche bibliografiche, ma le reti e le basi di dati su calcolatori li renderanno molto meno costosi, molto più validi e quindi molto più sfruttati.

I mercati a intermediazione informatica possono anche raccogliere eserciti di «mercenari intellettuali» dalla sera alla mattina. Potrebbe esserci, per esempio, un gran numero di consulenti che si occupano della realizzazione di progetti a breve termine tramite la rete. Un dirigente che dovesse far svolgere un dato lavoro, come la valutazione di un prestito o la progettazione di una nuova falciatrice, potrebbe raccogliere rapidamente un gruppo di questo tipo facendo un annuncio sulla rete o consultando una base dati delle persone disponibili. La base dati conterrebbe non solo le competenze e le tariffe, ma anche i commenti di altri che abbiano fruito in precedenza dei servizi dei candidati. A volte le società di consulenza e le agenzie pubblicitarie lavorano così anche oggi, ma reti a grande diffusione permetterebbero di costituire i gruppi di lavoro più rapidamente, per progetti più brevi, e scegliendoli da organizzazioni diverse.

Questo genere di mercato di servizi si potrebbe usare anche all'interno di una organizzazione e, invece di affidarsi sempre ai superiori per l'assegnazione dei compiti e dei tempi di esecuzione, si potrebbero creare grandi mercati interni per i servizi di singoli e di gruppi. Murray Turoff, del New Jersey Institute of Technology, ha suggerito come questo sistema potrebbe funzionare. Chi avesse bisogno per un breve progetto, poniamo, di un programmatore, potrebbe emettere un annuncio interno. Quotazioni e pagamenti nell'ambito del mercato interno potrebbero essere espressi in denaro o secondo un sistema di punteggi. Le quotazioni dei programmatori ne indicherebbero la competenza e la disponibilità, mentre i pagamenti ricevuti rifletterebbero la qualità delle loro precedenti prestazioni.

Il miglioramento delle tecnologie può contribuire anche a creare strutture decisionali che integrino contributi qualitativi di più persone. Per decisioni complesse, come per esempio la collocazione di un nuovo stabilimento, è essenziale poter disporre di un gran numero di dati e di opinioni. Oggi le società spesso giungono a queste decisioni dopo discussioni incomplete con solo una frazione delle persone dotate delle conoscenze o dei punti di vista validi. Nel futuro potrebbero utilizzare reti di calcolatori per organizzare e registrare in forma grafica i problemi sollevati, le alternative prospettatesi, le argomentazioni e le controargomentazioni: in questo modo molte persone diverse potrebbero rivedere e criticare gli aspetti di loro competenza o interesse.

Per esempio, qualcuno in un punto remoto della ditta potrebbe essere a conoscenza dei programmi di realizzazione di una nuova autostrada che modificherebbe in maniera radicale la convenienza di installare uno stabilimento in quel sito. Grazie al sovrapporsi di siffatte informazioni si potrebbero esprimere giudizi relativi alla praticabilità delle differenti ipotesi, finché in conclusione sarebbe una sola persona o un gruppo ristretto a prendere la decisione definitiva.

Che cosa succederà quando la società «globale» darà vita a un mondo dove grandissime quantità di informazioni saranno disponibili liberamente o a un costo accessibile? Evidentemente questo mondo avrà bisogno di servizi, automatizzati e non, per filtrare la straordinaria quantità di informazione disponibile. In generale, infatti, al crescere della mole di informazioni le persone in grado di analizzarla, elaborarla e agire con creatività su di essa in modi non automatizzabili diventano ancora più preziose.

Altri eventuali sviluppi, però, dipenderanno dai valori importanti per ciascun individuo. Quando treni e automobili ridussero i tempi di percorrenza, nuovi valori iniziarono a determinare i modelli di vita e di lavoro. Come ha documentato Kenneth T. Jackson, della Columbia University, valori importanti nella società statunitense, come il possesso di una casa propria e la superiorità morale della vita rurale, hanno avuto un ruolo decisivo nell'impostare la natura dei quartieri extraurbani.

Analogamente, quando i costi dell'informazione e del coordinamento non costituiscono una barriera al soddisfacimento delle esigenze e delle aspirazioni della gente, possono emergere altri valori a caratterizzare il lavoro personale e la società. Le nuove tecnologie informatiche contribuiranno sicuramente ad appagare alcune esigenze ovvie, come il guadagno, ma alcune delle strutture aziendali in formazione potrebbero rivelarsi particolarmente adatte a soddisfare necessità meno materiali, quelle che ora si esprimono sotto forma di competizione e di desiderio di autonomia. Forse, però, anche queste sono manifestazioni di bisogni ancora più originari, esigenze di autorealizzazione o di appagamento spirituale. Per usare con saggezza le nuove tecnologie dovremo pensare attentamente ai valori cui realmente tendiamo, e a quali sono i nostri fini più profondi.

(Da «Le Scienze» n. 279, novembre 1991.)

THOMAS W. MALONE *dirige il Center for Coordination Science del Massachusetts Institute of Thecnology. In precedenza ha lavorato presso lo Xerox Palo Alto Research Center.*

JOHN F. ROCKART *dirige il Center for Informations System Research.*

Elaborazione avanzata per la medicina

di Glenn D. Rennels
ed Edward H. Shortliffe

Sistemi capaci di archiviare e recuperare dati in modo selettivo saranno presto in grado di fornire assistenza diagnostica e terapeutica

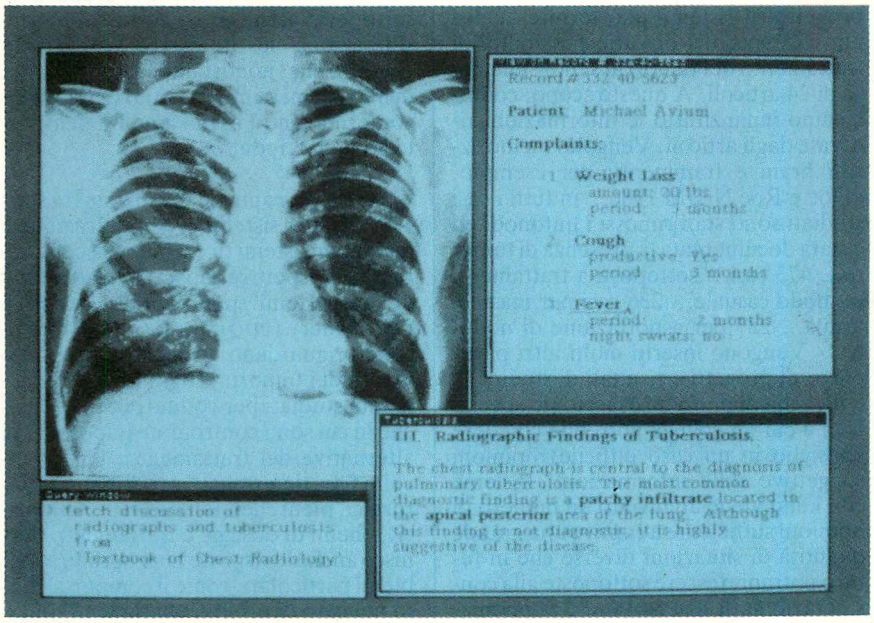
Da settimane la signora Jones ha dolori alla schiena. È rimasta a letto, ha preso qualche aspirina, ma non è servito a nulla. Forse, pensa, un analgesico sarebbe più efficace, e così va dal nuovo medico curante, nella città in cui si è recentemente trasferita. Racconta al dottore che il dolore è cominciato subito dopo la sua prima partita di tennis dell'anno. La visita rivela solo qualche limitazione di mobilità del gomito sinistro e una certa sensibilità nella parte inferiore della schiena.

Il medico si affida al suo calcolatore personale, attraverso il quale ha accesso a una rete che copre tutti gli Stati Uniti, e si collega alla banca dati dell'ospedale della città da cui proviene la signora Jones. La banca dati dell'ospedale conserva in forma elettronica tutta la documentazione relativa ai pazienti, alla quale gli operatori sanitari autorizzati possono accedere. Nel giro di pochi secondi il medico scopre che la signora Jones è stata sottoposta cinque anni fa a un intervento chirurgico per l'asportazione di un piccolo tumore alla mammella. Da allora è sempre stata bene e non ha nemmeno pensato di citare questo evento quando si è lamentata del suo male di schiena.

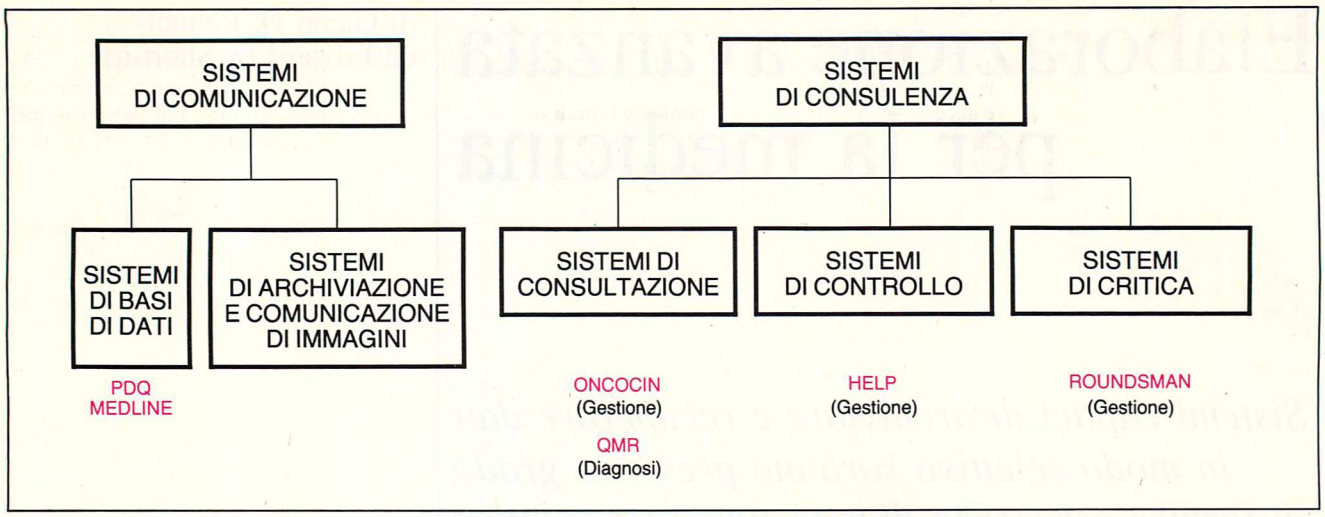
Il dottore chiude il collegamento con l'ospedale e chiama QMR, un sistema per la diagnosi nella cui memoria è archiviata un'ampia documentazione relativa a quasi 600 malattie. Il sistema avanza l'ipotesi che la signora Jones possa avere l'artrite, uno strappo muscolare oppure una recidiva del tumore con metastasi alla base della colonna vertebrale. Il medico, vedendo che una delle «opinioni» del sistema concorda con le sue preoccupazioni, prescrive un esame radiologico della colonna vertebrale, per controllare l'ipotesi di una recidiva della neoplasia.

Una situazione del genere non è più un sogno avveniristico. È probabile che non sia lontano il giorno in cui i medici considereranno il calcolatore uno strumento essenziale per la loro professione quanto lo stetoscopio. I sistemi di informazione medica che stanno uscendo dai laboratori di ricerca possono essere divisi in due categorie: «sistemi di comunicazione», che archiviano informazioni mediche, le recuperano selettivamente e le trasmettono, e «sistemi di consulenza», che applicano le informazioni per aiutare i medici nella diagnosi delle condizioni di un paziente, come QMR nel caso descritto, o per proporre, controllare e gestire un trattamento terapeutico.

I progressi grazie ai quali questi sistemi diventeranno sempre più efficienti riguardano tanto l'hardware quanto il software. I progressi nell'hardware renderanno i sistemi di elaborazione più efficaci, ma in molti laboratori, compreso il nostro alla School of Medicine della Stanford University, l'accento è posto sullo sviluppo di software che permetta di trasferire nel calcolatore l'informazione e l'esperienza medica e renda facilmente accessibili quelle informazioni e quell'esperienza al medico utente. Cominceremo con il descrivere, a titolo di esempio, le caratteristiche e le potenzialità dei sistemi di comunicazione e dei sistemi di consulenza. Poi discuteremo alcuni problemi fondamentali che continuano a vanificare i tentativi dei programmatori di sviluppare software in grado di «ragionare» su un caso come farebbe un medico.



Un terminale può portare nell'ambulatorio di un medico il reparto radiologico, l'archivio delle cartelle cliniche e la biblioteca medica. In questo caso ipotetico, il medico ha chiesto la radiografia del torace di M. A. e la sua cartella clinica. I disturbi lamentati dal paziente indicavano una tubercolosi e il medico ha chiesto al sistema di cercare in un manuale la descrizione delle immagini radiografiche tipiche della malattia, che il calcolatore ha individuato e visualizzato in basso sullo schermo.



I sistemi di informatica medica possono essere divisi in sistemi di comunicazione e sistemi di consulenza. I primi archiviano, recuperano e trasmettono materiale bibliografico, cartelle cliniche di pazienti e altri dati. I sistemi di consulenza partecipano alla diagnosi o alla gestione delle cure a un paziente. I sistemi di cui si parla nel testo sono evidenziati in colore.

L'esigenza di sistemi di comunicazione nasce in parte dal fatto che per un medico (o per un ricercatore in campo biomedico) è sempre più difficile leggere, memorizzare e ricordare tutte le informazioni necessarie alla soluzione di un problema particolare. Un medico può non aver incontrato da mesi o da anni il sintomo di cui si lamenta un paziente, o la malattia che lo affligge: e nell'arco di quei mesi o di quegli anni le tecnologie di diagnosi e di terapia possono essere cambiate.

Perciò i medici hanno cominciato a usare basi di dati di letteratura, o sistemi di recupero di informazioni bibliografiche, dei quali negli Stati Uniti MEDLINE è l'esempio più noto. Il grande calcolatore della National Library of Medicine di Bethesda, dove il sistema è stato sviluppato, conserva praticamente tutti i titoli degli articoli pubblicati nel mondo negli ultimi 25 anni su temi biomedici, nonché i riassunti completi dei più recenti. Ogni articolo è archiviato con parole e frasi chiave scelte con cura, in modo che sia relativamente facile individuare gli articoli che possono interessare e poi chiedere di vederne i riassunti. Esistono inoltre sistemi di recupero di informazioni bibliografiche che archiviano anche tutto il testo degli articoli e permettono all'utente di identificare frasi significative all'interno di qualunque articolo.

Con l'aggiunta di ulteriori capacità al suo repertorio, il calcolatore diventerà il mezzo principale per accedere alla letteratura biomedica e alle basi di dati di patologia, delle quali saranno responsabili le biblioteche. Esse non saranno più viste come edifici pieni di libri e di periodici, ma come sorgenti distribuite di informazioni. Questa concezione in effetti non è in conflitto con il modello tradizionale che considera le biblioteche mediche come centri di informazione: semplicemente, le nuove tecnologie permettono a quel modello di valicare i confini delle strutture fisiche.

I sistemi di comunicazione forniscono accesso alle informazioni; sono in via di sviluppo sistemi di consulenza che possono applicare le informazioni archiviate alla soluzione di specifici problemi reali. Per esempio, con alcuni colleghi stiamo lavorando da tempo su un sistema di consulenza sperimentale che abbiamo chiamato ROUNDSMAN. Più specificamente, si tratta di un sistema di analisi critica: il medico descrive un problema clinico e il piano d'azione che si propone di seguire e ROUNDSMAN gli fornisce un'analisi critica di quel piano.

Obiettivo centrale del sistema è permettere l'accesso non solo ai dati che si trovano negli articoli, ma anche al *significato* che i dati assumono alla luce dell'esperienza. In questa fase iniziale di progetto, il sistema può fornire analisi per casi specifici di varie possibilità di trattamento dei tumori al seno, sulla base di 24 articoli. A questo scopo, codifichiamo innanzitutto le informazioni ricavate dagli articoli. Vengono memorizzati brani e frammenti: per esempio, «Doe e Roe NEJM 1986... in tutti i casi studiati sono stati rimossi i linfonodi ed è stata documentata la presenza di tumore... 473 casi... sottoposti a trattamenti in modo casuale... 236 casi per mastectomia... 237 per asportazione di noduli...» Vengono inseriti molti altri particolari di progetti e risultati di studio.

Poi chiediamo a un esperto (lo specialista a cui un collega potrebbe chiedere consiglio in un caso difficile) opinioni soggettive sulle informazioni. Insieme con i dati viene archiviato un numero di opinioni sufficiente a coprire una grande quantità di situazioni diverse che in futuro potranno essere sottoposte alla considerazione di ROUNDSMAN. Supponiamo che lo specialista ci dica che le conclusioni di un certo studio debbono essere applicate con cautela alle pazienti affette da tumore allo stadio II, perché le pazienti esaminate in quella ricerca (che avevano i linfonodi positivi) erano più gravi; il consiglio dell'esperto e il suo modo di formulare il problema vengono inseriti nella memoria del sistema.

Pensiamo a ciò che sarebbe accaduto se ROUNDSMAN fosse stato utilizzato quando l'ipotetica signora Jones aveva scoperto per la prima volta un nodulo e ne aveva parlato a un chirurgo. Egli l'avrebbe visitata, avrebbe fornito al sistema le caratteristiche della paziente e avrebbe proposto un'asportazione del nodulo. ROUNDSMAN avrebbe risposto: «Doe e Roe riferiscono nel "New England Journal of Medicine", nel 1986, che in casi del genere l'asportazione del nodulo si è dimostrata efficace, ma tenga presente che la popolazione dello studio citato aveva una prognosi peggiore di quella della sua paziente». Dopo aver sottoposto al chirurgo questa e altre considerazioni, ROUNDSMAN avrebbe dichiarato che, nonostante le discrepanze, in linea di massima i risultati dello studio confermavano l'opportunità dell'asportazione del nodulo.

Si possono capire le distinzioni fra software per sistemi di comunicazione e quelli per sistemi di consulenza considerando le rispettive capacità e gli obiettivi di due sistemi sperimentali, Physician Data Query (PDQ) e ONCOCIN. I due sistemi riguardano protocolli di trattamento dei tumori: programmi accuratamente studiati per condurre prove cliniche in cui sono confrontate impostazioni alternative del trattamento. Un protocollo fissa determinati procedimenti chirurgici, piani chemioterapici o radiologici, schemi di dosaggi e trattamenti. Fornisce anche le risposte appropriate a problemi particolari, come il comportamento nel caso di effetti collaterali al trattamento o l'interruzione di una terapia quando questa non si dimostri efficace.

PDQ è un sistema di comunicazione: una base di dati, gestita congiuntamente dal National Cancer Institute e dalla National Library of Medicine, che può for-

nire ai medici informazioni relative ai protocolli messi a punto per un gran numero di esperienze cliniche attualmente in corso. Con un calcolatore personale e un modem, un medico può avere accesso a un calcolatore centrale presso la biblioteca e, con l'aiuto di programmi specializzati, può identificare i protocolli che potrebbero essere adatti a particolari pazienti. I protocolli solitamente presentano modi nuovi di affrontare casi difficili, che il medico può essere in grado di adottare (a meno che il protocollo comporti la somministrazione di un farmaco in via di sperimentazione). In alternativa, il medico può richiedere i nomi degli ospedali e dei medici più vicini che partecipano agli esperimenti relativi a un certo tipo di trattamento e quindi rinviare a essi il paziente.

Supponiamo che l'esame della colonna vertebrale prescritto alla signora Jones confermi la presenza di una formazione tumorale alla base della colonna. Il medico può chiedere a PDQ i nomi di centri medici che stiano studiando cure avanzate per il tumore al seno in fase metastatica; queste informazioni gli consentiranno di indirizzare la sua paziente a uno di quei centri.

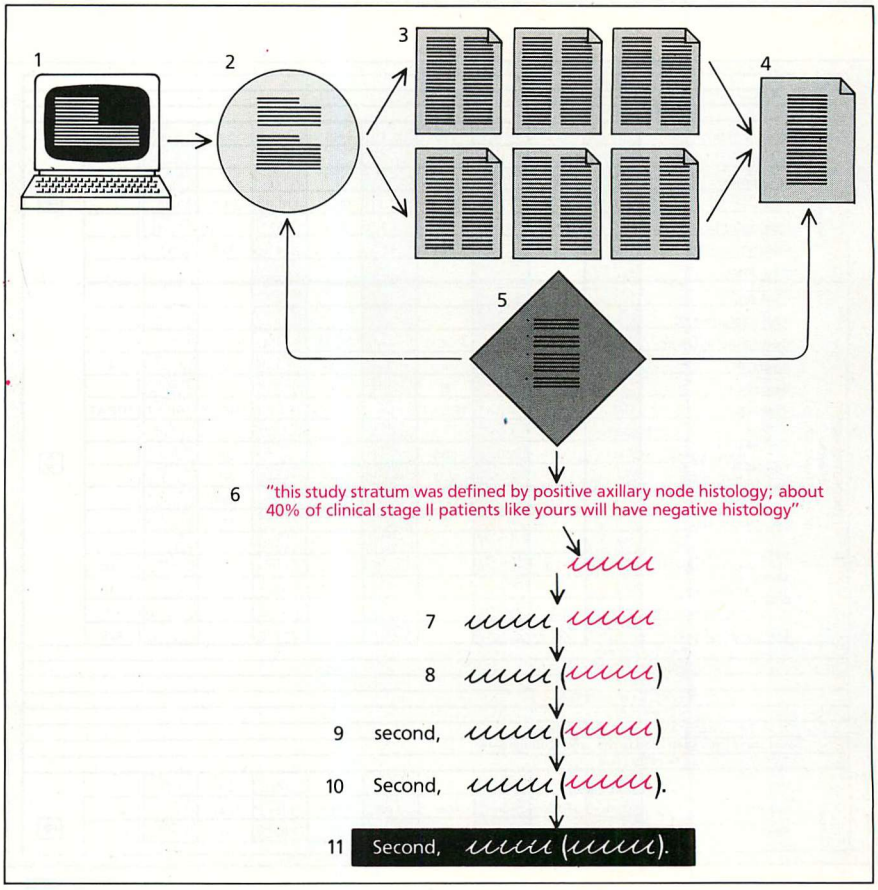
Il sistema PDQ è stato pensato per presentare un'ampia gamma di informazioni, non per aiutare l'utente ad applicarle a un paziente specifico. ONCOCIN, un sistema complementare a PDQ progettato da noi e dai nostri colleghi, aiuta i medici che hanno in cura pazienti affetti da tumore, dopo che la scelta del protocollo è stata effettuata e il trattamento è già in corso. ONCOCIN è sia un sistema di documentazione medica, sia un sistema di consulenza (che per il momento è in grado di seguire solo pochi protocolli di trattamento). Tiene nota del decorso della cura e dei progressi del paziente, ma possiede anche un bagaglio di conoscenze sufficiente per assumere un ruolo attivo, suggerendo come il protocollo possa essere adattato alle esigenze di un particolare paziente.

Supponiamo che la signora Jones venga coinvolta come paziente nella sperimentazione clinica di un nuovo trattamento farmacologico presso un centro per lo studio e la cura dei tumori. A ogni visita i medici che eseguono una serie di trattamenti chemioterapici complessi possono essere guidati dal sistema ONCOCIN, il quale archivia i risultati di ogni esame, prende nota delle condizioni della paziente e propone come vadano modificati i dosaggi dei singoli farmaci in base alle risposte al trattamento.

I particolari del protocollo, all'interno del calcolatore, sono rappresentati in strutture note come regole di inferenza. Per esempio, una regola può dire: «*Se* il conteggio dei globuli bianchi del paziente è inferiore al normale, ma superiore a 3000 per millimetro cubo, *allora* somministrare il farmaco *A*, ma con un dosaggio pari solo al 75 per cento di quello normale». Regole di questo tipo permettono a ONCOCIN di dare consigli sulla terapia che è meglio somministrare in una particolare visita, o di richiedere determinati esami. Quello che appare sullo schermo ad alta risoluzione del sistema è simile a un modulo su carta che è già familiare agli oncologi, i quali descrivono i loro pazienti compilando determinate sezioni del modulo. ONCOCIN visualizza i suoi suggerimenti riempiendo caselle vuote in altre aree dello schermo. Se l'utente vuole porre domande sul suggerimento ricevuto, ONCOCIN cerca di fornire una spiegazione in base alla logica del protocollo, così come è memorizzata nelle regole del programma. L'utente, ovviamente, è sempre libero di ignorare il consiglio: nessun programma di calcolatore può avere accesso a tutta la gamma di variabili che il medico curante deve prendere in considerazione quando stabilisce la terapia di un paziente. Si ipotizza che l'utente possa avere ulteriori informazioni, che richiedono una modifica del consiglio di ONCOCIN.

I problemi principali ancora aperti nella ricerca su sistemi come ROUNDSMAN e ONCOCIN riguardano il software (e di alcuni ritorneremo a discutere più avanti), ma progressi nel campo dell'hardware, come unità di elaborazione più veloci e chip di memoria di maggiore capacità, potranno sicuramente agevolare l'uso quotidiano di questi sistemi. Oggi, per esempio, i chip di memoria possono contenere solo un numero limitato di protocolli. Se il protocollo di un certo paziente non è nella memoria interna, la macchina deve caricare le informazioni necessarie da un dispositivo di memoria di massa, un disco, sostituendole alle informazioni che si trovano in quel momento nella memoria interna. Questo processo di sostituzione è lento, forse troppo lento per l'uso normale in una clinica. I chip di memoria ad alta capacità in corso di sviluppo potranno ridurre sostanzialmente la frequenza di queste operazioni di sostituzione.

Da quel che abbiamo detto a proposito di ROUNDSMAN e ONCOCIN è chiaro che lo stile dell'interazione fra un sistema di consulenza e i suoi utenti può variare. ROUNDSMAN, come abbiamo detto, è un sistema di analisi critica: reagisce a ciò che pensa l'utente (la proposta di una modalità d'azione, un'ipotesi



ROUNDSMAN genera commenti su un piano di cura proposto fornendo brani tratti da articoli apparsi su riviste e i relativi commenti. È qui indicato il processo di generazione di una frase. Il medico inserisce una descrizione del paziente e della cura proposta (*1*). Il sistema organizza i dati in un «contesto clinico» (*2*), cerca un articolo pertinente (*3*) ed estrae dati significativi (*4*). Poi richiama la sua base di conoscenze tratte da valutazioni di esperti (*5*) e la usa per fare un confronto con il contesto clinico. Un'affermazione che deriva dal confronto (*6*) diventa parte del testo in preparazione. Il sistema fa precedere alla sua affermazione una generalizzazione (*7*), mette fra parentesi i particolari (*8*), aggiunge la parola «second» per organizzare l'affermazione in un elenco (*9*), mette la maiuscola e il punto (*10*) e visualizza il risultato (*11*).

Cover Sheet
Mass / X-ray
Disease Activity

Hematology										
WBC x 1000	7.6	8.0	4.0	3.5	6.4	6.3	6.2	5.1	3.3	7.8
% polys		54	24							
% lymphs		20	30							
PCV	32.8	33.9	27.2	27.3	27.6	25.7	26.5	24.3	30.6	
Hemoglobin	11.1	11.4	9.1	9.4	9.5	8.8	9	8.2	10.4	
Platelets x 1000	300	244	296	294	42	61	141	323	241	250
Sed. Rate										
CHEMOTHERAPY (includes non-cytoxic drugs)										
BSA (m2)										
Arm assignment										
Combination Name	POCC	VAM	POCC	POCC	VAM	VAM	VAM	POCC	POCC	
Cycle #	1	2	2	2	3	3	3	3	3	
Subcycle	B		A	B				A	B	
Visit type	TREAT	TREAT	TREAT	TREAT	DELAY	DELAY	TREAT	TREAT	TREAT	
Procarbazine (100)(MG/M2)x8	200		200	200				200	200	
Vincristine (1,5)(MG/M2)x1	2.0		1.5	2.0				2.0	2.0	
Cytoxan (600)(MG/M2)x1	1300		1300	1300				1300	1300	
CCNU (60)(MG/M2)x1			130	0				130		
VP16 (75)(MG/M2)x3		170					130			
Adriamycin (50)(MG/M2)x1		110					80			
Methotrexate (30)(MG/M2)x1		65					45			
Cum. Adriamycin		230.0					310.0			
Radiotherapy										
Symptom Review										
Toxicity								?		
Physical Examination										
Chemistry								?		
To order: Labs and Procedures										
To order: Nuclear Medicine and Tomography										
Scheduling										
Time										
Day	6	27	20	31	24	1	8	29	5	26
Month	Feb	Feb	Mar	Mar	Apr	May	May	May	Jun	Jun
Year	87	87	87	87	87	87	87	87	87	87

Cover Sheet
Mass / X-ray
Disease Activity

Hematology										
WBC x 1000	7.6	8.0	4.0	3.5	6.4	6.3	6.2	5.1	3.3	7.8
% polys		54	24							
% lymphs		20	30							
PCV	32.8	33.9	27.2	27.3	27.6	25.7	26.5	24.3	30.6	
Hemoglobin	11.1	11.4	9.1	9.4	9.5	8.8	9	8.2	10.4	
Platelets x 1000	300	244	296	294	42	61	141	323	241	250
Sed. Rate										
CHEMOTHERAPY (includes non-cytoxic drugs)										
BSA (m2)										
Arm assignment										
Combination Name	POCC	VAM	POCC	POCC	VAM	VAM	VAM	POCC	POCC	VAM
Cycle #	1	2	2	2	3	3	3	3	3	4
Subcycle	B		A	B				A	B	
Visit type	TREAT	TREAT	TREAT	TREAT	DELAY	DELAY	TREAT	TREAT	TREAT	TREAT
Procarbazine 100MG/M2x14	200		200	200				200	200	
Vincristine 1,5MG/M2x1	2.0		1.5	2.0				2.0	2.0	
Cytoxan 600MG/M2x1	1300		1300	1300				1300	1300	
CCNU 60MG/M2x1			130	0				130		
VP16 (75)(MG/M2)x3		170					130			170
Adriamycin (50)(MG/M2)x1		110					80			110
Methotrexate (30)(MG/M2)x1		65					45			65
Cum. Adriamycin		230.0					310.0			420
Radiotherapy										
Symptom Review										
Toxicity										
Physical Examination										
Chemistry										
To order: Labs and Procedures										
To order: Nuclear Medicine and Tomography										
Scheduling										
Time										
Day	6	27	20	31	24	1	8	29	5	26
Month	Feb	Feb	Mar	Mar	Apr	May	May	May	Jun	Jun
Year	87	87	87	87	87	87	87	87	87	87

ONCOCIN fornisce consulenza chemioterapica tramite un tabellone elettronico: qui sono mostrate due «istantanee» corrispondenti, rispettivamente, alla fase di raccolta dei dati e di consulenza. Sono aperte le finestre che riguardano l'ematologia e la chemioterapia; altre finestre sono disponibili. Il medico inserisce i dati ematologici relativi al 26 giugno (*in alto*). Con la conoscenza del protocollo applicabile, delle condizioni del paziente e del trattamento precedente, ONCOCIN applica regole per consigliare i dosaggi da prescrivere nella visita del 26 giugno (*in basso*); in condizioni diverse, il sistema avrebbe potuto modificare i dosaggi o consigliare di posticipare il trattamento.

diagnostica) e suggerisce, se necessario, delle alternative. Un sistema di consultazione, invece, genera analisi e raccomandazioni indipendenti, che gli utenti possono confrontare con le proprie idee e le proprie valutazioni. Mentre ONCOCIN offre una consulenza sul trattamento della malattia di un paziente, il sistema di consulenza Quick Medical Reference (QMR), citato all'inizio dell'articolo, può essere consultato in merito alla diagnosi.

QMR è un adattamento per i microcalcolatori di INTERNIST-1, un programma diagnostico di grandi dimensioni sviluppato alla School of Medicine dell'Università di Pittsburgh. Ha conoscenze relative a 577 malattie e alle loro correlazioni con 4100 segni, sintomi e altre caratteristiche dei pazienti. Il sistema può essere utile agli operatori sanitari in tre modi. Fondamentalmente QMR è un sistema esperto di consultazione che fornisce ipotesi diagnostiche specifiche per singoli pazienti. Per arrivare a questo si chiede: con quale frequenza i pazienti con determinate caratteristiche hanno una particolare malattia? Con quale frequenza i pazienti con una certa malattia presentano determinate caratteristiche? Il sistema può richiedere le informazioni necessarie, qualora non gli siano state fornite, e può suggerire esami clinici, evidenziando aspetti sui quali ritiene necessarie ulteriori ricerche. Analizza le informazioni ottenute e formula la diagnosi più probabile (o le diagnosi più probabili).

In secondo luogo, QMR può fungere da manuale elettronico, che elenca le caratteristiche documentate associate a una data malattia o, viceversa, specifica quale delle 577 malattie che conosce può essere associata con una data caratteristica. In terzo luogo, come «tabellone elettronico», può combinare più caratteristiche o più malattie e determinarne le implicazioni. Per esempio, si possono segnalare due problemi medici in apparenza privi di relazione, per ottenere qualche suggerimento sul modo in cui alcune malattie, nelle circostanze adatte, potrebbero dar luogo ad ambedue i problemi.

INTERNIST-1, il predecessore di QMR, si comportava quasi come un medico accademico nella diagnosi di casi difficili. Oltre a essere dotato della stessa ampia base di conoscenze e della stessa capacità di formulare diagnosi, QMR ha la possibilità di funzionare come un manuale elettronico e come un tabellone. Attualmente QMR è in corso di sperimentazione «sul campo» all'Università di Pittsburgh e in altri istituti che collaborano a questo progetto.

Quando un sistema di consulenza come QMR è isolato, in genere fornisce risposte solo dietro esplicita richiesta. L'utente di uno di questi sistemi, inoltre, deve inserire manualmente le informazioni su un paziente, informazioni che, invece, potrebbero essere già presenti in un sistema vicino di comunicazione e di gestione dei dati. Potrebbe un

sistema di consulenza accedere direttamente a una fonte di dati per fornire spontaneamente un consiglio ogni volta che se ne presenti l'opportunità? Uno dei primi sistemi di informazione integrati per istituti ospedalieri in grado di fare ciò si chiama HELP ed è in corso di sviluppo da 15 anni allo LDS Hospital di Salt Lake City.

HELP gira su un calcolatore centrale al quale sono collegati, in tutto l'ospedale, terminali e stampanti. Al momento ci sono, per esempio, almeno quattro terminali e una stampante in ogni sala infermieri e un terminale accanto a ogni letto nelle unità di terapia intensiva; il progetto prevede un terminale accanto a tutti i 520 letti dell'ospedale. Il calcolatore centrale è innanzitutto un dispositivo di gestione dei dati, che archivia l'anamnesi di ogni paziente all'accettazione e tiene nota di tutte le medicazioni, dei risultati di laboratorio e delle condizioni di ciascun paziente. Oltre a svolgere il ruolo di gestione dei dati, il calcolatore centrale incorpora migliaia di particolari sottoprogrammi logici chiamati settori HELP, che hanno la funzione di controllare tutti i dati disponibili per ciascun paziente e di vigilare sul verificarsi di specifiche situazioni di allarme.

Quando l'ipotetica signora Jones venne ricoverata per il primo intervento al seno, un sistema come HELP avrebbe potuto controllare senza soluzione di continuità le medicazioni, i risultati degli esami di laboratorio e le sue funzioni vitali. A differenza di un medico, HELP può passare in rassegna i risultati degli esami nel giro di pochi secondi, sia di giorno sia di notte. Supponiamo che la signora Jones prendesse un farmaco, la digossina, per disturbi cardiaci. Se gli esami del sangue avessero indicato un basso livello di potassio, HELP avrebbe potuto avvertire l'infermiera addetta alla sua assistenza che un basso livello di potassio è pericoloso per un paziente a cui viene somministrata digossina e che probabilmente la signora Jones avrebbe avuto bisogno di un trattamento in tempo breve con una soluzione di cloruro di potassio per via orale.

HELP è un ottimo esempio di come la flessibilità e l'efficacia di un sistema di consulenza possano essere esaltate dall'integrazione con un sistema di comunicazione; ed HELP è solo agli inizi. La tecnologia delle reti locali dovrebbe consentire di abbinare ai sistemi informatici ospedalieri un sistema di consulenza specializzato come ROUNDSMAN, un sistema diagnostico e anche un dispositivo che porti radiografie, sonogrammi, TAC e altre visualizzazioni dal reparto di radiologia a terminali collocati in ogni sala operatoria e accanto a tutti i letti.

Data la loro potenza e la disponibilità di versioni sperimentali, perché i sistemi medici avanzati non hanno ancora un uso clinico generalizzato? Il fatto è che la metodologia per la costruzione di sistemi di consulenza non è ancora matura: la progettazione di un software ef-

Elenco delle associazioni

Malattia polmonare e DIARREA cronica

Malattie correlabili con i riscontri obiettivi immessi nel calcolatore

atelectasia
causata da sindrome carcinoide secondaria a neoplasia bronchiale

polmonite acuta eosinofila (LOEFFLER)
causata da anchilostomiasi

polmonite da Legionella
predisponente/secondaria a sindrome da immunodeficienza acquisita (AIDS)

pleurite essudativa
causata da pseudocisti pancreatica

polmonite pneumococcica
predisponente/secondaria a sindrome carcinoide secondaria a neoplasia bronchiale

polmonite pneumocistica
predisponente/secondaria a sindrome da immunodeficienza acquisita (AIDS)

ipertensione polmonare secondaria
predisponente/secondaria a sclerosi sistemica progressiva
o associata a schistosomiasi epatica cronica

infarto polmonare
predisponente/secondario a carcinoma del corpo o della coda del pancreas
o predisponente/secondario a carcinoma della testa del pancreas
o causato da ostruzione della vena porta

linfoma polmonare
concomitante a linfoma del colon
o concomitante a linfoma dell'intestino tenue

fibrosi interstiziale secondaria diffusa
causata da sclerosi sistemica progressiva

A QMR viene chiesto (*in colore*) di elencare malattie che possano spiegare la presenza di due disturbi apparentemente distinti: malattia polmonare e diarrea cronica. L'elenco riprodotto è parte della risposta completa generata a partire dalla base di conoscenze riguardanti 577 malattie, 4100 caratteristiche dei pazienti e le loro correlazioni.

REGOLA

Per determinare il dosaggio del metotressato somministrato in chemioterapia VAM nei protocolli 20-83-1 e 2091:

Se: il livello di creatinina nel siero (in mg per dl) supera 1,5

Allora: non somministrare metotressato

CASELLARIO

Nome: Tularemia

	Intensità di evocazione	Frequenza
Sintomi e segni:		
FEBBRE	0	5
PELLE coltura lesione Francisella tularensis	5	4
LINFONODO ingrossato	1	4
PELLE ulcerazioni	1	4
ECG tachicardia	0	4
TULARENSIS esame della pelle positivo	4	3
ESPOSIZIONE a conigli roditori altri mammiferi	2	3
ACARI storia recente di punture	2	3
CEFALEA molto forte	1	3
Può causare:		
Shock febbrile	1	2
Appendicite acuta	1	1
Predispone a:		
Endocardite acuta infettiva cuore sinistro	1	1

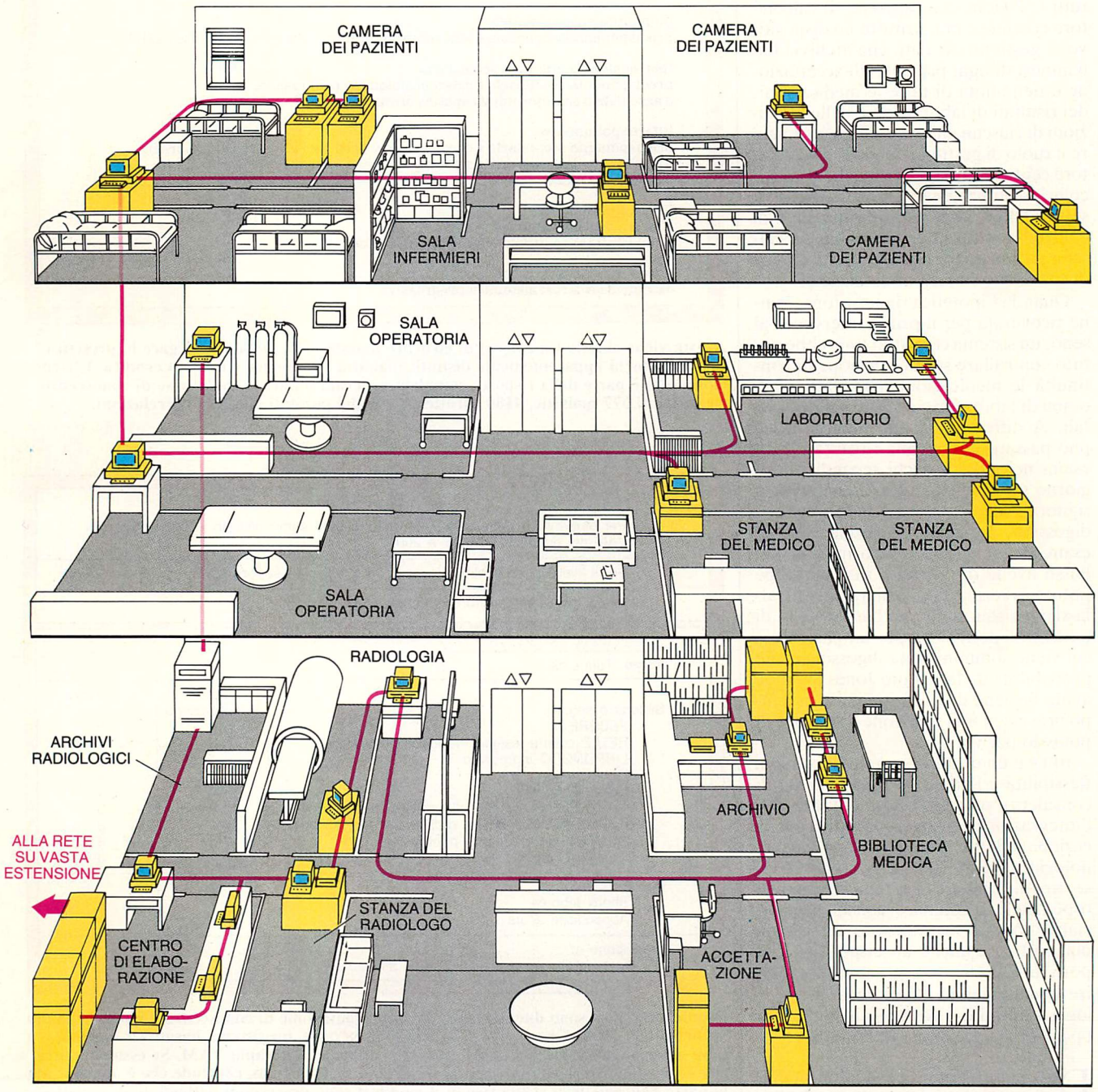
Regole e casellari sono due modalità di rappresentazione di conoscenze. Le regole hanno la forma «*Se* condizione *X*, *allora* azione *Y*». ONCOCIN, un sistema basato su regole, deve determinare i dosaggi appropriati per una chemioterapia VAM. Se esso stabilisce che è vera la parte «*se*» della regola relativa al metotressato, conclude che è appropriata la parte «*allora*» della stessa regola. I casellari sono descrizioni dettagliate di malattie e sintomi. In QMR, basato su casellari, il casellario per la tularemia riporta i legami «pesati» con vari segni, sintomi e altre malattie. I pesi alla voce «*intensità di evocazione*» riflettono la probabilità che la malattia sia presente quando si osserva un certo sintomo: 0 significa che il sintomo non è specifico, 5 che la malattia ne è l'unica causa. I pesi alla voce «frequenza» indicano la probabilità che la malattia causi un dato sintomo: 1 corrisponde a una bassa probabilità, 5 quasi alla certezza.

ficace pone ancora problemi fondamentali, teorici e pratici.

Un elemento essenziale della maggior parte dei sistemi di consulenza è la messa a punto di un modello di certe capacità cliniche, in particolare del processo decisionale. Come si può costruire un modello di una capacità così tipicamente umana e così specializzata? Le strategie sono differenti e si basano su impostazioni molto diverse fra loro: riconoscimento di configurazioni, regressione statistica, algoritmi di ramificazione e teoria delle decisioni. L'esame di un'ulteriore impostazione, l'intelligenza artificiale (IA) evidenzierà alcune difficoltà che si incontrano nello sviluppo di software per un sistema di consulenza.

Gli studiosi di IA in campo medico sono stati influenzati da ricerche psicologiche, che fanno pensare che un medico esperto si distingua principalmente per la ricchezza delle sue conoscenze (cioè per il suo archivio di informazioni su malattie, sintomi e trattamenti) e non per una qualche particolare modalità di elaborazione di quelle informazioni. I programmi che usano tecniche di IA per rappresentare e manipolare una conoscenza particolareggiata su un certo campo sono chiamati sistemi esperti. Per mettere a punto un sistema esperto, gli studiosi di IA in medicina cercano prima di tutto di sviluppare una rappresentazione ottimale della conoscenza medica nel calcolatore. Gran parte della validità di un sistema medico basato sulla conoscenza deriva dal suo archivio e dal modo in cui è strutturato, e non da tecniche originali di elaborazione (per esempio, un algoritmo che il calcolatore possa usare meglio di un essere umano).

Una delle prime sfide che si incontrano nella costruzione di un sistema basato sulla conoscenza è quella di affrontare la



Un sistema informatico ospedaliero trasmette testi e immagini a stazioni operative in tutto l'ospedale tramite una rete locale. Le informazioni sui pazienti possono essere inserite dalla accettazione, dall'archivio, dai laboratori, dalle sale operatorie e dai terminali accanto ai letti. I risultati archiviati di radiografie, TAC, ecografie e altri esami e il materiale bibliografico sono trasmessi con cavi a fibre ottiche ovunque siano necessari. Una rete permette l'accesso a basi di dati e sistemi di consulenza medica remoti. A differenza dei sistemi guidati da un calcolatore centrale, è possibile decentrare gran parte della memoria e dell'elaborazione alle stazioni operative. HELP, versione ridotta del sistema, è operativo allo LDS Hospital di Salt Lake City.

mole di informazioni che debbono essere rappresentate e manipolate. Prendiamo, per esempio, le 577 malattie e le 4100 caratteristiche di pazienti di QMR. Quando questi 4677 elementi sono collegati e valutati (per indicare che certi sintomi fanno pensare a determinate malattie, che una malattia può causarne un'altra e che certe caratteristiche del paziente sono più importanti di altre), la base di conoscenze di QMR contiene circa 250 000 elementi di conoscenza. Molti di questi elementi non sono documentati esplicitamente in alcun manuale. Ci sono voluti 10 anni di collaborazione tra informatici e medici perché questi elementi diventassero abbastanza concreti ed espliciti da poter essere rappresentati nel sistema. Inoltre, QMR copre soltanto un sottoinsieme delle malattie importanti note. Un compito essenziale nella progettazione dei sistemi esperti, quindi, è l'identificazione degli elementi chiave della conoscenza e delle loro interrelazioni, poi la loro codifica in strutture di dati e in legami che rendano possibile l'applicazione efficace della conoscenza alla soluzione di problemi.

Un secondo problema di progettazione sta nell'assicurarsi che le strutture di dati che rappresentano gli elementi di conoscenza permettano agli utenti l'ampliamento e la correzione delle conoscenze. Nuove scoperte possono portare cambiamenti nella pratica medica e un sistema basato sulla conoscenza deve accettare modifiche che amplino la sua base di conoscenze. Non sarebbe affatto pratico dover manipolare tutto il programma per ogni aggiornamento. La struttura di dati (che si tratti di liste, di una gerarchia, di una rete o di qualsiasi altra struttura) che rappresenta la conoscenza medica dovrebbe pertanto essere, in via teorica, indipendente dagli algoritmi che manipolano quella stessa conoscenza. Questa indipendenza non è facile da raggiungere, perché una parte della conoscenza medica è in se stessa parzialmente algoritmica, in quanto specifica una strategia per la soluzione di problemi, anziché un fatto effettivo. Per esempio, chi deve formulare una diagnosi cerca in genere di stabilire per prima cosa l'ambito generale di una malattia (per esempio, «disturbi epatici») e poi tenta di individuare la particolare patologia presentata dal paziente.

Inoltre, ogni elemento della conoscenza medica dovrebbe essere rappresentato, idealmente, in forma modulare, così che una modifica apportata a un elemento non intacchi gli altri. Per esempio, due strutture di dati pensate per ottenere questa modularità sono le regole e i casellari (*frame*). Una regola è un enunciato inferenziale che ha la forma «Se *A*, allora *B*», mediante il quale un sistema può raggiungere una conclusione attraverso la tecnica logica detta *modus ponens*: se *A* implica *B*, e si sa che *A* è vero, allora se ne può dedurre *B*. I risultati dedotti per mezzo di una regola possono essere usati da un'altra regola per una seconda inferenza: le regole, cioè, si «concatenano» dinamicamente.

Un casellario, d'altra parte, rappresenta un'entità, per esempio una malattia, individuata da «caselle» che definiscono i tratti caratteristici di quell'entità, come i sintomi causati dalla malattia. È possibile anche definire metodi per dedurre il contenuto delle caselle da altri aspetti del casellario o da altri casellari.

La modularità consentita da regole e casellari è in sé difficile da ottenere, in parte perché la conoscenza medica è qualcosa di più della somma delle sue parti. Per esempio, ROUNDSMAN rappresenta nella sua base di conoscenze ogni articolo di rivista come un oggetto distinto. Quando viene pubblicato un nuovo articolo, l'operazione più semplice sarebbe quella di accrescere la base di conoscenze modularmente. Tuttavia le nuove informazioni presenti in un articolo spesso gettano nuova luce su articoli precedenti, modificandone l'interpretazione. Quanto più si cerca di realizzare questo aspetto non modulare della conoscenza medica (per esempio inserendo richiami ad altri articoli in modo da rappresentarne le correlazioni) tanto più complessa diviene la base di conoscenze, con elementi strettamente accoppiati, al punto da diventare inaccessibile quando si cerca di aggiornarla.

Una terza sfida per i ricercatori è dovuta al fatto che la medicina possiede solo modelli limitati del corpo umano e delle malattie. È una situazione notevolmente diversa da quella dei sistemi progettati, per esempio, per agevolare un processo di produzione industriale. Nella produzione industriale si ha una chiara comprensione della funzione dei singoli componenti e del loro montaggio: i problemi di produzione e la diagnosi dei guasti possono essere affrontati spesso prendendo in considerazione le caratteristiche combinatorie di una sequenza di montaggio o i modi in cui i singoli componenti possono dar luogo a disfunzioni.

Conosciamo, a questo livello meccanicistico, un ristretto numero di componenti del corpo umano e pochissime loro funzioni. I medici pertanto hanno bisogno di usare un'ampia gamma di conoscenze tra le quali regole empiriche apprese dai migliori professionisti, dati derivanti da analisi statistiche di esperimenti clinici, meccanismi causali dedotti dall'anatomia, dalla fisiologia e dalla biologia molecolare, problemi sociali connessi con l'assistenza medica. Un compito fondamentale per coloro che mettono a punto sistemi informatici per la medicina è lo sviluppo di tecniche per codificare e applicare tipi così diversi di conoscenze in modo coordinato.

I compiti concettuali e di progettazione che devono essere affrontati da chi sviluppa sistemi di consulenza possono essere messi a confronto con i problemi pratici che già si pongono coloro che sviluppano sistemi di comunicazione. Sono problemi che si possono valutare meglio considerando gli ostacoli che si incontrano nell'introduzione di un sistema di archiviazione e comunicazione di immagini o PACS (*Picture-Archiving and Communication System*). Questi sistemi hanno già superato da tempo lo stadio della ricerca, ma non sono ancora diffusi perché la loro realizzazione è ostacolata da problemi logistici ed economici.

Un PACS archivia radiografie e altre immagini mediche in forma digitale, le trasferisce ovunque siano necessarie e presenta sullo schermo visualizzazioni ad alta definizione. Attualmente i medici vanno fino al reparto radiologia per esaminare una radiografia e spesso sono gli stessi pazienti a dover portare le loro radiografie da ambulatorio ad ambulatorio. Ovviamente sarebbe meglio che le immagini radiografiche potessero essere distribuite direttamente alle corsie d'ospedale e alle cliniche, soprattutto se la stessa radiografia fosse richiesta da medici diversi in luoghi diversi.

Disponiamo già del software per creare immagini e visualizzarle in questo modo; esistono linee di comunicazione su fibra ottica che possono consentire le necessarie velocità di trasferimento dell'ordine dei 200 megabit al secondo; sono disponibili terminali che visualizzano le immagini con risoluzione sufficiente (in effetti sono già utilizzati nell'industria cinematografica e televisiva). Certamente i sistemi digitali per immagini trarranno vantaggio da ulteriori ricerche, ma anche la tecnologia attuale potrebbe migliorare di molto la distribuzione e l'interpretazione di immagini mediche. Però, nell'attuale clima di competizione finanziaria, al quale anche la medicina non si sottrae, risulta difficile giustificare una nuova tecnologia ad alto costo.

Che cosa occorrerebbe per introdurre un PACS in un ospedale moderno e già affollato di apparecchiature? L'introduzione della rete a fibre ottiche, oltre che costosa, provocherebbe un disagio enorme. Per distribuire le immagini ad alta risoluzione in tutto l'ospedale sarebbero necessarie numerose stazioni operative, ciascuna con unità video ad alta definizione - 2048 per 2048 pixel (unità d'immagine) - in grado di rappresentare da cinque a otto sfumature di grigio.

Dato il costo di un simile sistema, alcuni istituti adottano apparecchi di gestione delle immagini in modo frammentario: se occorre sostituire un'apparecchiatura convenzionale, ne acquistano una digitale. Solo a poco a poco arriveranno ad avere abbastanza apparecchiature digitali e stazioni operative per integrarle in una rete PACS, superando i numerosi ostacoli finanziari o logistici.

(Da «Le Scienze» n. 232, dicembre 1987.)

GLENN D. RENNELS *lavora presso il Medical Computer Science Group della Stanford University School of Medicine.*

EDWARD H. SHORTLIFFE *insegna alla Stanford University School of Medicine.*

I teleoperatori

di William R. Uttal

Tecnologia elettronica e capacità dell'uomo possono essere combinate in sistemi in grado di lavorare in tempo reale in ambienti ostili o altrimenti inaccessibili

Come si possono eseguire senza rischio lavori materiali in un ambiente pericoloso, per esempio in una cella ad alta attività di un reattore, nella prima linea di un combattimento o nelle profondità dell'oceano? Un modo, per ora solo ipotetico, sarebbe quello di impiegare un robot autonomo; un altro, adottato in dispositivi già esistenti, è quello di ricorrere a un teleoperatore, cioè a una macchina azionata a distanza da una persona. Un dispositivo del genere consente di disporre, per l'esecuzione di un dato compito, della percezione, del giudizio e dell'abilità di un essere umano, mentre questi controlla il teleoperatore da una posizione comoda e sicura.

Che il luogo dove il lavoro dev'essere eseguito sia la stanza accanto o un lontano pianeta, l'idea di base è sempre la stessa: fornire all'operatore un raggio d'azione maggiore di quello consentito da uno strumento tradizionale. In senso stretto un teleoperatore non è un robot, in quanto questo tipo di macchina è controllato dall'intelligenza, dalla percezione e dalla destrezza di un uomo e non dall'unità di elaborazione centrale di un calcolatore. Quindi la teleoperazione, cioè la trasmissione a distanza dell'informazione relativa al lavoro che si intende svolgere, è in sostanza un caso particolare di comunicazione bidirezionale. Infatti, l'operatore, mentre invia i segnali di comando agli strumenti che lavorano nel sito lontano, deve seguire costantemente le condizioni del sito.

Che un teleoperatore sia controllato da una persona è in realtà un grande vantaggio. Negli ultimi 30 anni si sono avuti diversi periodi di ottimismo, in cui si era creduta prossima la realizzazione di robot comandati da calcolatore e completamente autonomi, capaci di lavorare in luoghi pericolosi per l'uomo o in cui la presenza di esseri umani fosse da escludere per motivi di tempo, di denaro o di distanza. Ogni volta però queste speranze si sono scontrate con difficoltà pratiche, poiché le tecniche di intelligenza artificiale necessarie si rivelavano più difficili da padroneggiare del previsto. Alcuni ostacoli che si trovano sulla via dell'automazione completa possono essere superati con progressi tecnici, ma se ne frappongono altri di tipo fondamentale.

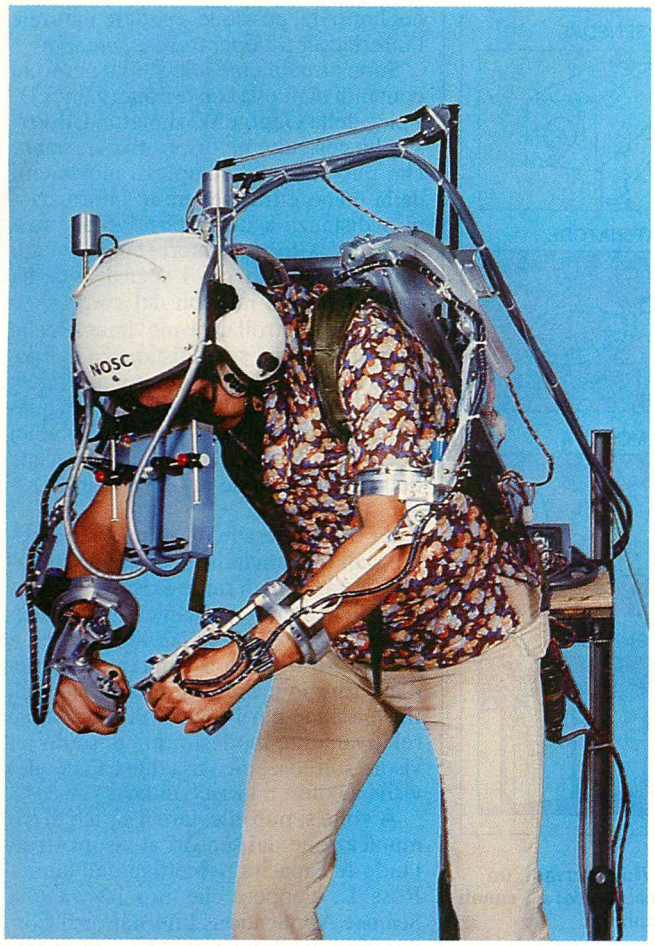
Fortunatamente per eseguire lavori in luoghi lontani o pericolosi non è necessario disporre di un calcolatore del tutto competente e autonomo: in molti casi i teleoperatori sono già in grado di assolvere questi compiti, come ha dimostrato la recente esplorazione del relitto del *Titanic*. In molti laboratori di tutto il mondo, compreso il laboratorio del Naval Ocean Systems Center (NOSC) di Hawaii, dove ho lavorato per tre anni, si tenta di ampliare il campo di applicazione di queste macchine controllate a distanza. Il problema fondamentale è quello di progettare collegamenti funzionali e flessibili tra operatore e macchina. La soluzione di questo problema dipende tanto dalle abilità percettive, cognitive e motorie dell'uomo quanto da considerazioni costruttive.

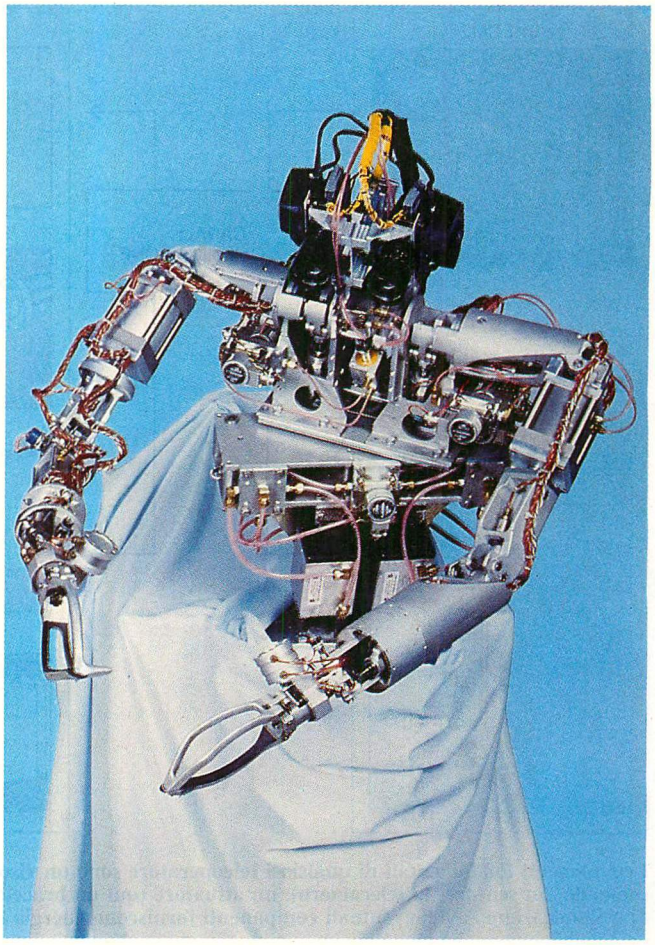
Tutti i sistemi teleazionati hanno in comune alcune componenti di base: i sensori, per ricevere informazioni sul teatro delle operazioni; un visore o altro indicatore, che consente all'operatore di seguire la situazione; comandi, con cui l'operatore mette in atto le proprie decisioni; un attuatore, che in genere è uno strumento; e, cosa forse più importante, canali di comunicazione, che trasmettono le informazioni dai sensori al visore e dai comandi all'attuatore. Inoltre ogni teleoperatore ha alcune esigenze logistiche fondamentali: la telestazione di lavoro dev'essere trasportata nella sua sede, dev'essere in grado di mantenersi in assetto mentre esegue il suo compito e deve possedere una potenza sufficiente per far funzionare gli strumenti ed eventualmente il veicolo che la trasporta.

I primi teleoperatori degni di questo nome furono i telemanipolatori, messi a punto negli anni quaranta, per materiali radioattivi. Il visore era una semplice finestra che consentiva all'operatore di osservare il lavoro; i comandi erano connessi direttamente agli attuatori (di solito pinze e strumenti per afferrare) per mezzo di collegamenti meccanici: aste rigide oppure cavi e fili. Nei teleoperatori attuali i collegamenti sono spesso indiretti e consistono in segnali trasportati da cavi elettrici, da fibre ottiche o addirittura da onde radio. In certi sistemi moderni che operano a breve distanza si sono dimostrati efficienti gli attuatori idraulici. Qualunque sia la tecnologia impiegata o la distanza da superare, il compito delle vie di comunicazione è sempre lo stesso: fornire all'operatore informazioni adeguate sullo stato e sull'ambiente degli attuatori e trasmettere i segnali di comando che consentano agli attuatori di riprodurre i movimenti dell'operatore umano.

Poiché il visore riproduce la scena del luogo di lavoro lontano, l'operatore prova un senso di «presenza a distanza». Non è ancora chiaro se questa illusione di essere sul posto migliori in modo sensibile le prestazioni, né si sa quale sia il modo ottimale per dare una sensazione di presenza a distanza. È ovvio che non si vogliono riprodurre esattamente tutte le condizioni del sito lontano, compresi il calore, la pressione, la radiazione oppure le altre caratteristiche dannose che hanno consigliato appunto l'impiego di un teleoperatore.

Al tempo stesso è chiaro che se l'ambiente di lavoro reale viene riprodotto sul visore in modo distorto, le prestazioni possono risultare compromesse. Di conseguenza si sono fatti molti sforzi per determinare, tra l'altro, il miglior campo visivo del visore, che influisce sulla velocità apparente con cui gli oggetti attraversano il campo. Uno dei problemi più importanti nella ricerca e nello sviluppo dei teleoperatori è stabilire quali stimoli visivi, e in quale forma, si debbano fornire all'operatore.





Green man **è un teleoperatore che consente a un uomo (*a sinistra*) di azionare a distanza una stazione di lavoro antropomorfa (*a destra*). Due telecamere collocate sulla stazione inviano informazioni a schermi in miniatura montati sul casco dell'operatore; viene trasmesso anche il suono. I movimenti della stazione di lavoro riproducono quelli dell'operatore. I segnali di comando sono trasmessi per via idraulica dalla bardatura dell'operatore alla stazione di lavoro. Questo sistema sperimentale permette di studiare i fattori umani del teleazionamento nel laboratorio del Naval Ocean Systems Center (NOSC) di Hawaii.**

In parecchi dei teleoperatori costruiti oggi al NOSC, l'operatore guarda in un visore stereoscopico, azionato da due telecamere gemelle situate sulla macchina distante; il visore gli dà l'illusione di essere sul posto. Non è necessario che la separazione fra le telecamere coincida con l'ordinaria separazione fra gli occhi dell'uomo. Se le telecamere vengono reciprocamente allontanate, l'operatore riesce a distinguere molto meglio la profondità degli oggetti. Edward H. Spain del NOSC ha tuttavia scoperto che esiste una distanza di separazione ottimale fra le telecamere, oltre la quale la capacità dell'operatore di discriminare la profondità peggiora invece di migliorare.

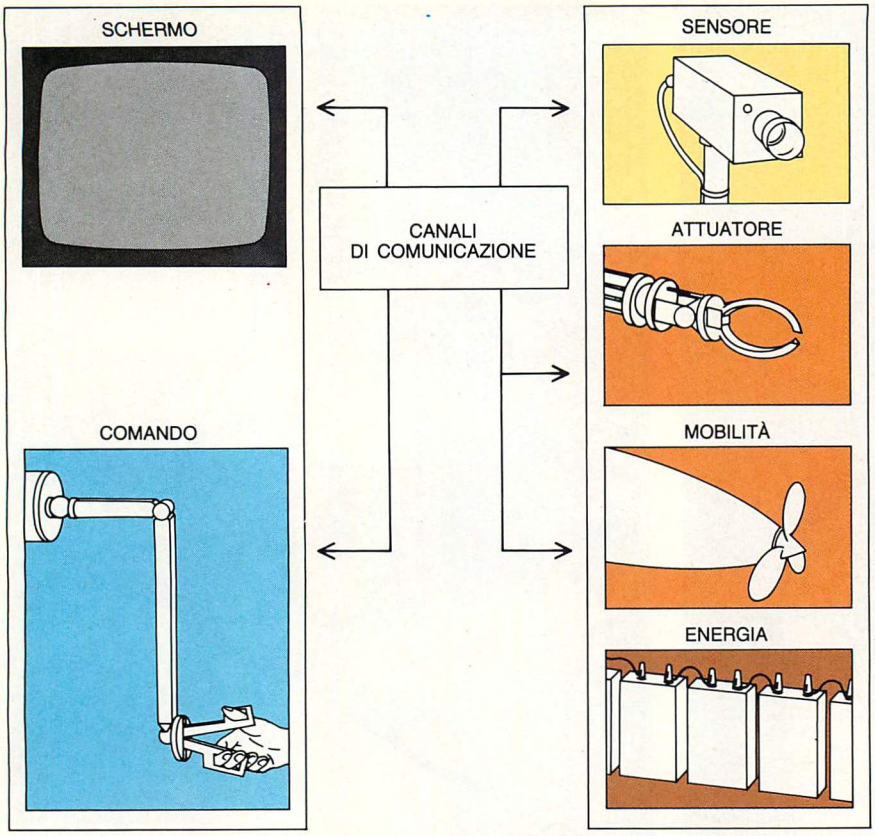
Le capacità percettive dell'operatore possono anche essere ampliate da sensori televisivi capaci di rivelare forme di radiazione elettromagnetica diverse dalla luce visibile, consentendo di «vedere» oggetti normalmente invisibili all'uomo. È probabile che nel prossimo futuro le tecniche di elaborazione delle immagini al calcolatore miglioreranno la qualità dei dati visivi inviati dai sensori al visore. Gli oggetti verranno isolati da sfondi complessi e le superfici mal riprodotte saranno ricostruite automaticamente. Non sempre però è necessario migliorare un'informazione visiva scadente mediante elaborazione al calcolatore: le mie ricerche dimostrano che un osservatore percepisce facilmente oggetti e configurazioni in modo quasi completo anche se la presentazione che ne compare sullo schermo è lacunosa o disturbata.

In certi sistemi, la presentazione visiva è resa più efficace dal suono; il segnale sonoro per esempio può mettere in guardia l'operatore di un veicolo subacqueo teleazionato contro le collisioni in acque buie. I progettisti stanno anche cercando di introdurre nei sistemi di teleoperatori trasduttori «tattili», le cui retroazioni dai telestrumenti potrebbero consentire all'operatore di controllare la forza esercitata su un oggetto evitando così di danneggiarlo. Attualmente vengono sviluppati sistemi in cui l'informazione tattile che proviene da un telesensore viene riprodotta in un trasduttore tattile a forma di guanto, consentendo all'operatore di «palpare» l'oggetto distante.

Un sistema con trasduttore tattile potrebbe dare informazioni sulla forma dell'oggetto quando i segnali visivi fossero per esempio schermati da acqua torbida o quando l'oggetto uscisse dal campo visivo della telecamera. La capacità di «afferrare» può essere molto utile per un teleoperatore, come lo è per una persona che vada a tentoni nel buio o che lavori su un oggetto nascosto alla vista.

Mentre i trasduttori visivi e tattili per i teleoperatori sono stati oggetto di molta attenzione, poco invece si è fatto finora per ideare nuovi tipi di comandi. I comandi oggi esistenti sono normali interruttori, leve o barre, dispositivi progettati semplicemente per far riprodurre all'attuatore lontano le risposte motorie dell'operatore: per esempio per fargli serrare le pinze quando l'operatore chiude un comando a forbice.

La tecnologia informatica ha recentemente iniziato a dare contributi interessanti ai sistemi di controllo dei teleoperatori. Per migliorare la qualità dell'immagine si può inserire un calcolatore nel canale che va dal sensore al visore: analogamente si può inserire un calcolatore nella via di comunicazione che collega i comandi all'attuatore. Così, per esempio, non sarebbe necessario che i movimenti del comando e dell'attuatore avessero gli stessi gradi di libertà, poiché il calcolatore tradurrebbe automatica-



I componenti fondamentali di qualsiasi teleoperatore sono un visore (lo schermo), un comando, un sensore (la telecamera), un attuatore (qui un braccio meccanico) e i canali di comunicazione. Altri eventuali componenti forniscono energia e mobilità.

mente il sistema di coordinate dell'ingresso nel diverso sistema di coordinate dell'uscita. Si potrebbe anche programmare il calcolatore per fargli amplificare in modo non lineare la risposta dello strumento, così da non costringere l'operatore ad applicare ai comandi tutto il corrispondente incremento di forza. Altre trasformazioni, semplici e complicate, assistite dal calcolatore potrebbero, *nei limiti del possibile, rendere naturale* l'interfaccia tra operatore e comando.

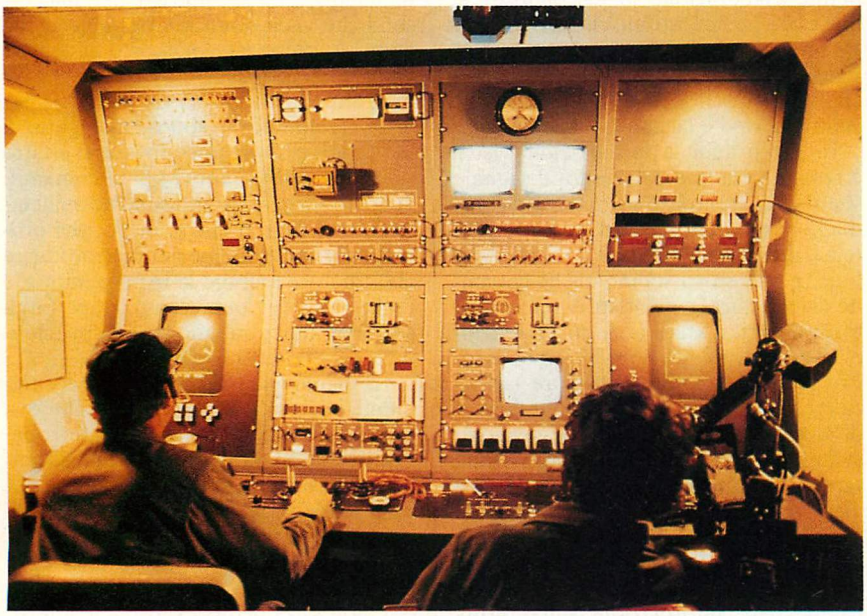
Sono attualmente allo studio parecchi comandi di nuova concezione. James D. Foley della George Washington University ha costruito un dispositivo a guanto che può sentire i complessi movimenti della mano e trasmettere le informazioni a distanza a un dispositivo a forma di mano. Altri ricercatori stanno sviluppando sistemi in cui i segnali elettrici provenienti dai muscoli del corpo sono usati per controllare i movimenti delle protesi. (Anche se la distanza a cui devono lavorare gli arti è molto inferiore a quella di un normale teleoperatore, questi sistemi presentano problemi simili a quelli che deve affrontare chi si occupa della progettazione di teleoperatori.)

Per trasmettere le informazioni sensoriali e i comandi, in certi teleoperatori bastano fili di rame e rispettivamente collegamenti meccanici o idraulici. Quasi sempre, tuttavia, l'operatore e l'attuatore devono scambiarsi quantità d'informazione molto grandi. L'onere di trasmissione per i segnali di controllo è relativamente modesto, ma di solito un visore stereoscopico usa due canali televisivi a colori a larga banda.

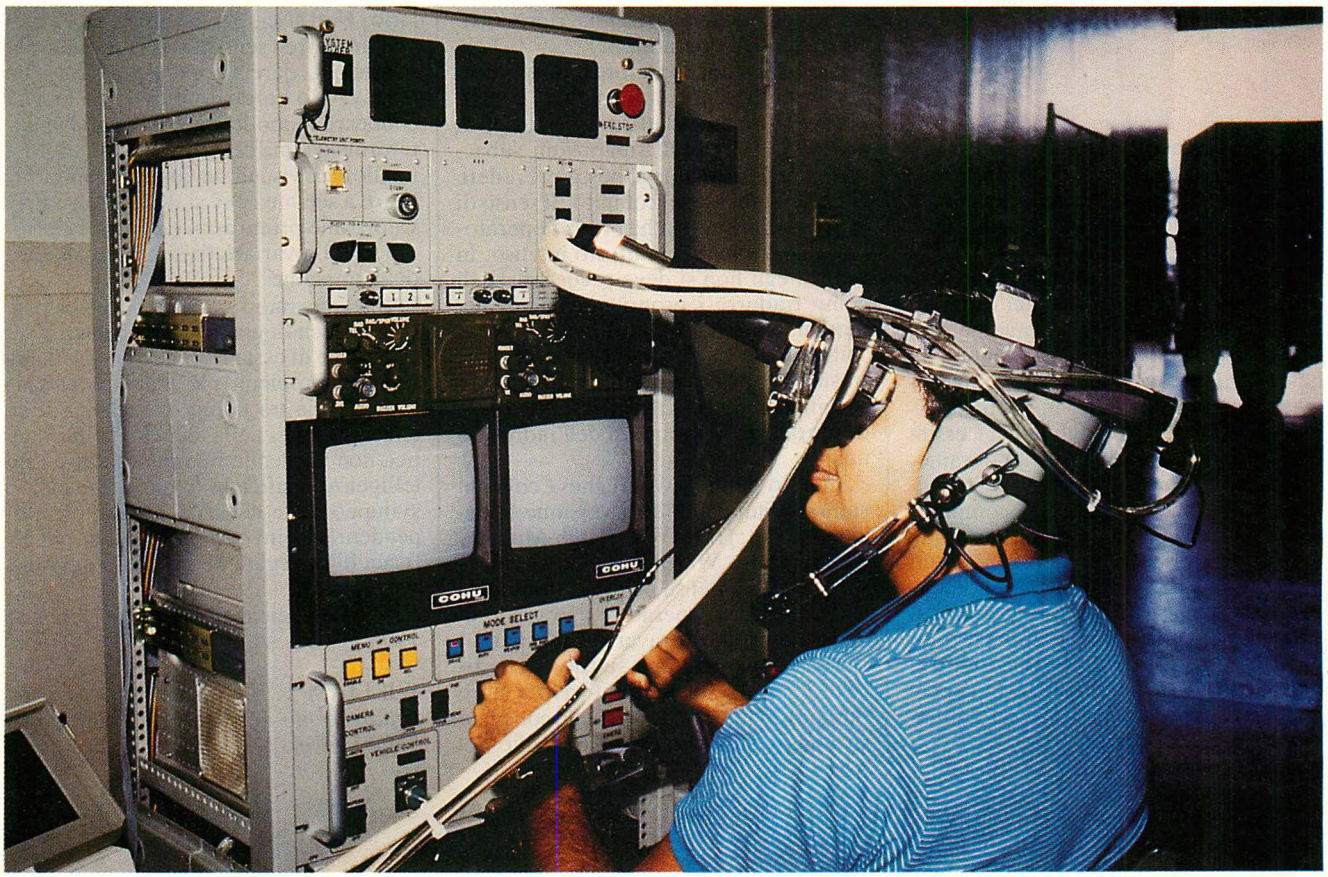
A volte si può alleviare il carico di comunicazione dai sensori al visore sfruttando le capacità percettive dell'uomo. Ross L. Pepper, che ora lavora alla Science Applications International Corporation, ha dimostrato che il sovraccarico potenziale del canale di comunicazione può essere ridotto trasmettendo un'immagine a colori a bassa risoluzione su uno dei due canali televisivi e un'immagine monocromatica ad alta risoluzione sull'altro. Se alla stazione dell'operatore le due immagini vengono combinate si ottiene un'immagine stereoscopica a colori di qualità modesta, ma sufficiente. La qualità dell'immagine è abbastanza buona perché l'osservatore non si renda conto dell'economia dei mezzi di trasmissione.

I teleoperatori progettati per funzionare su grandissime distanze, nello spazio o sulla Terra, devono servirsi per comunicare di canali radio o televisivi, oppure, in mare, di segnali acustici. Ma per i teleoperatori in cui è possibile mantenere un legame fisico tra operatore e strumento, le fibre ottiche sono una manna. Una singola fibra ottica può trasportare fino a 400 milioni di bit al secondo e l'esiguità del suo diametro consente di filarla su grandi distanze (fino a 300 chilometri) da un'unica bobina. Fibre avvolte con precisione possono essere filate anche ad alta velocità da un aereo per controllare sistemi militari teleazionati, come ha dimostrato Jack E. Holzschuh con fibre costruite da Arthur T. Nakagawa e colleghi al NOSC.

Per i sistemi teleazionati sottomarini le fibre ottiche vengono filate anche dalle navi. In questi teleoperatori, tra i quali si annovera l'Advanced Tethered Vehicle, costruito al NOSC da Robert T. Hoffman, in generale la telestazione è



Trasduttori, visori e comandi di un sistema teleazionato possono essere molto complessi. Qui si vede la stazione in superficie di una telestazione di lavoro subacquea del NOSC. Il dispositivo a destra, a forma di braccio, comanda un manipolatore subacqueo.



Un autoveicolo teleazionato è una piattaforma di ricognizione in grado di perlustrare zone a rischio senza mettere in pericolo l'operatore. Il veicolo (*in alto*) ha due telecamere gemelle installate sul sedile di guida ed è comandato da segnali inviati dalla stazione dell'operatore attraverso un cavo a fibre ottiche. I comandi (*in basso*) riproducono quelli di un veicolo comune.

Una piattaforma volante può essere comandata a distanza. La piattaforma, che è alta una sessantina di centimetri e ha un'elica come propulsore, può sollevarsi e perlustrare vaste aree. Le telecamere possono inviare segnali a uno schermo dando all'operatore l'impressione di trovarsi a bordo del mezzo.

sospesa a un cavo che, oltre a trasportare le informazioni, deve anche fornire energia e sostenere un peso cospicuo. Il peso non è solo quello della stazione di lavoro, ma anche quello del cavo stesso, che può essere molto grande. Sostituendo le fibre ottiche al rame nei canali di comunicazione, il peso del cavo può essere ridotto di molto: da 23 a 9 tonnellate nel caso di un cavo che sorregga una stazione di profondità. (Per funzioni diverse dalla comunicazione, il cavo necessita di un'ulteriore grande quantità di rame, acciaio e altri materiali.)

Oltre a essere leggeri e compatti, quando siano opportunamente rivestiti i cavi di fibre ottiche sono molto resistenti alla rottura e non perdono l'integrità ottica e meccanica neppure se schiacciati ripetutamente dalle ruote di un veicolo. Contrariamente ai cavi elettrici, inoltre, quelli a fibre ottiche offrono ottima protezione contro l'intercettazione dell'informazione trasportata.

Dopo aver descritto i componenti fondamentali di un teleoperatore e alcuni problemi relativi alla loro progettazione, posso ora illustrare nel loro complesso alcuni sistemi avanzati di teleoperatori realizzati al NOSC. Forse uno dei più suggestivi sotto il profilo concettuale è il prototipo di un teleoperatore antropomorfo, denominato *green man*, che è stato ideato da David C. Smith e Frank P. Armogida e costruito da Herbert L. Mummery. L'operatore indossa una bardatura a esoscheletro e guarda dentro due schermi televisivi in miniatura montati su un casco e posti proprio davanti ai suoi occhi. I comandi del teleoperatore coincidono con il telaio dell'esoscheletro che, essendo snodato, segue i movimenti dell'operatore. Oltre a riprodurre i movimenti della testa e delle braccia, questo teleoperatore è in grado di seguire anche i movimenti del collo e del busto.

La stazione di lavoro, che ora dista dall'operatore solo un paio di metri, è uno «strumento» antropomorfo. Essa è provvista di due telecamere per inviare informazione visiva agli schermi e di due microfoni per inviare suoni agli auricolari dell'operatore, fornendogli un'esperienza biaurale straordinaria. Allo stesso tempo i segnali inviati dall'operatore attraverso un sistema di comunicazione idraulico spostano il busto e il collo e muovono le braccia e le mani a pinza. I movimenti della telestazione riproducono quelli dell'operatore.

I sistemi a teleoperatore antropomorfo presentano notevoli vantaggi e sono particolarmente adatti per certi tipi di lavori, per esempio riparazioni subacquee per le quali non si possa prevedere la natura precisa del compito. Il senso di presenza a distanza che prova l'operatore del *green man* è piuttosto intenso: in pratica egli non si deve preoccupare di come tradurre i propri movimenti nei movimenti della telestazione di lavoro. Tuttavia c'è ancora molto da fare per trasformare questi teleoperatori in dispositivi pratici e capaci in particolare di riprodurre la destrezza dell'individuo umano.

Intanto Thomas W. Hughes e colleghi stanno sviluppando una versione teleazionata del HMMWV (High-Mobility Multipurpose Wheeled Vehicle) dell'esercito statunitense, che sostituisce la classica jeep. L'operatore è in grado di vedere il terreno attraverso uno schermo stereoscopico montato su casco, che riceve i segnali (tramite un cavo a fibre ottiche) da telecamere gemelle collocate su una «testa» sistemata sul sedile del guidatore. Le proprietà ottiche delle telecamere e dello schermo hanno effetti complessi sulla capacità dell'operatore di controllare il veicolo, effetti sui quali si sta ancora indagando.

Un effetto piuttosto sgradevole con cui i progettisti di questo teleoperatore devono fare i conti è il «mal di simulatore», eufemismo con cui si indica una forte nausea, che spesso impedisce all'operatore di agire, dovuta soprattutto al conflitto tra la percezione del moto che ha l'operatore (rafforzata dallo schermo stereoscopico) e l'assenza di movimento reale, e quindi di stimolazione sull'orecchio interno. La predisposizione individuale al mal di simulatore è alquanto varia e i ricercatori stanno tentando di precisare quali possano essere gli stimoli scatenanti.

Un altro teleoperatore che Hughes e colleghi stanno costruendo è l'AROD (Airborne Remotely Operated Device), una piccola piattaforma di osservazione molto mobile. L'AROD può librarsi o spostarsi sotto il controllo a distanza di un operatore e può fornire dati di ricognizione altrimenti non accessibili a un osservatore a terra. Anche in questo caso la funzione dell'uomo nel sistema solleva seri problemi. Benché l'operatore umano possegga un'enorme «potenza di calcolo», esigue variazioni della configurazione del sistema possono influire drasticamente sulla sua capacità di controllarlo. Non si sa, per esempio, se sia meglio montare i sensori sulla piattaforma, in modo da dare all'operatore l'illusione di trovarsi a bordo, oppure se sia meglio collocarli in modo che osservino la piattaforma da una certa distanza. La forma migliore di visualizzazione potrebbe differire a seconda che si tratti di un osservatore alle prime armi o di uno esperto, e potrebbe variare da una fase all'altra della missione.

I teleoperatori prototipo dimostrano che la tecnologia fisica necessaria per costruirne di assai complessi è già disponibile. I problemi più ardui riguardano l'interfaccia tra uomo e macchina. Finché i progressi della tecnologia informatica non consentiranno di sostituire l'intelligenza artificiale a quella umana, lo sviluppo delle telestazioni di lavoro dipenderà dall'invenzione di modi più efficaci di collegare operatori e macchine.

(Da «Le Scienze» n. 258, febbraio 1990.)

WILLIAM R. UTTAL *è direttore del Dipartimento di psicologia alla Arizona State University.*

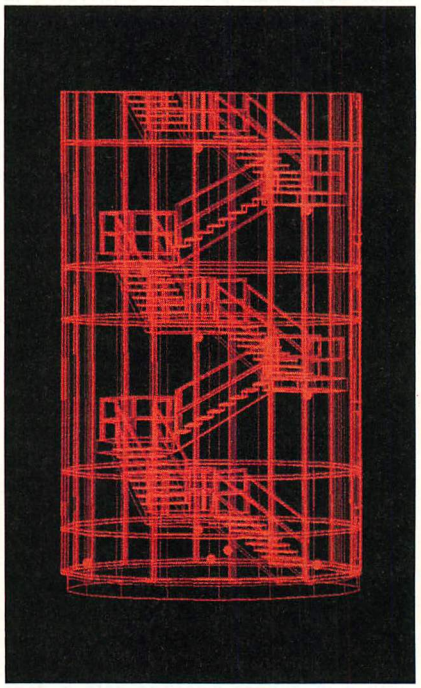
I calcolatori e l'architettura

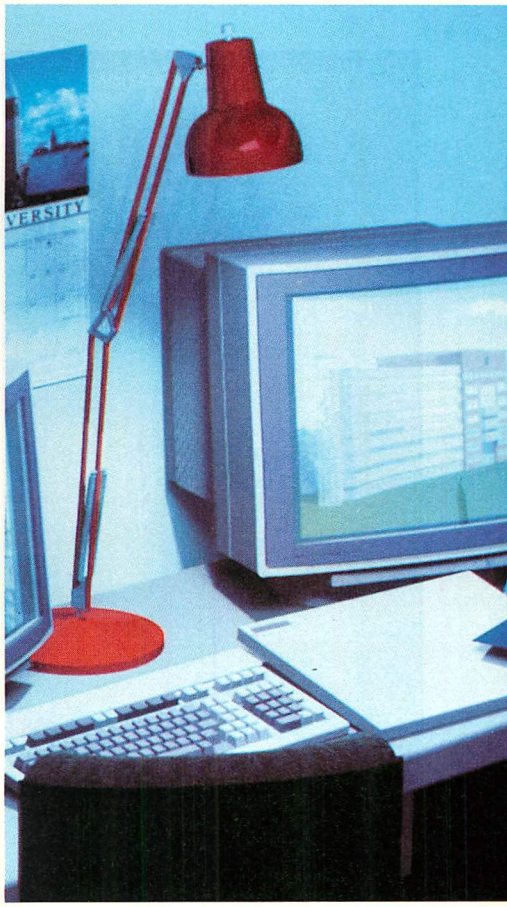
di Donald P. Greenberg

Grazie a sofisticati algoritmi di simulazione grafica tridimensionale ci si può muovere all'interno di un edificio allo stato di progetto

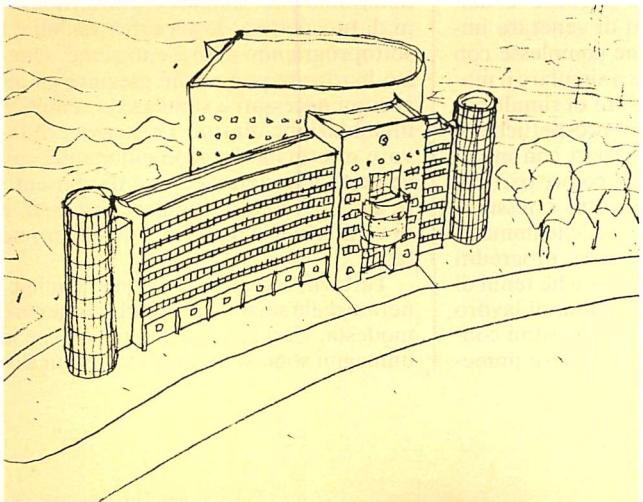
Dovendo progettare un edificio e i suoi spazi interni, gli architetti ricorrono magari a schizzi abbozzati su tovagliolini di carta. Progettisti e clienti valutano i progetti definitivi sulla base di disegni fatti a mano o di accurati modelli in miniatura. Molti dei cosiddetti sistemi di progettazione assistita da calcolatore usati dagli architetti in realtà non sono altro che ausilî informatici per disegnare: rendono automatico il tracciamento dei disegni esecutivi, ma non forniscono le informazioni percettive (tonalità di colore, ombre, grana delle superfici e movimento) necessarie per la valutazione di uno spazio architettonico.

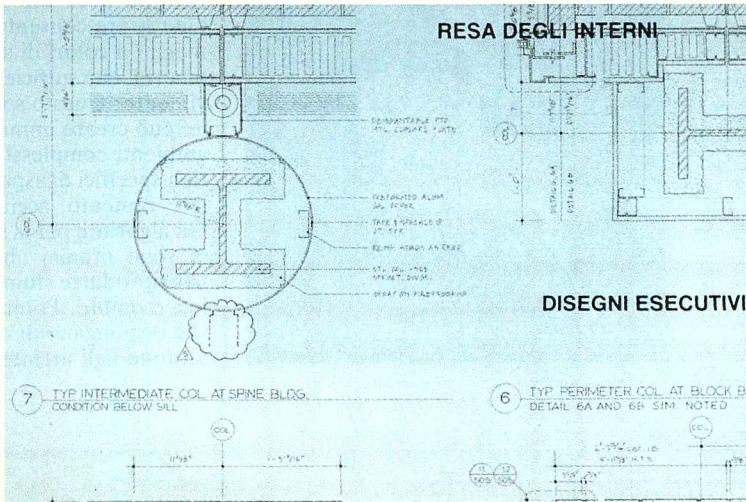
Oggi tuttavia nuovi programmi e tecniche avanzate di grafica prospettica al calcolatore cominciano a contribuire agli aspetti creativi dell'architettura. Questi programmi fanno risparmiare al progettista la parte più laboriosa del disegno e gli permettono di studiare nuove idee in tre anziché in due dimensioni. L'architetto può percorrere tutte le fasi preliminari di realizzazione del progetto, dagli schizzi allo studio delle possibili alternative, al perfezionamento del progetto, alla produzione di immagini realistiche da sottoporre ad analisi.





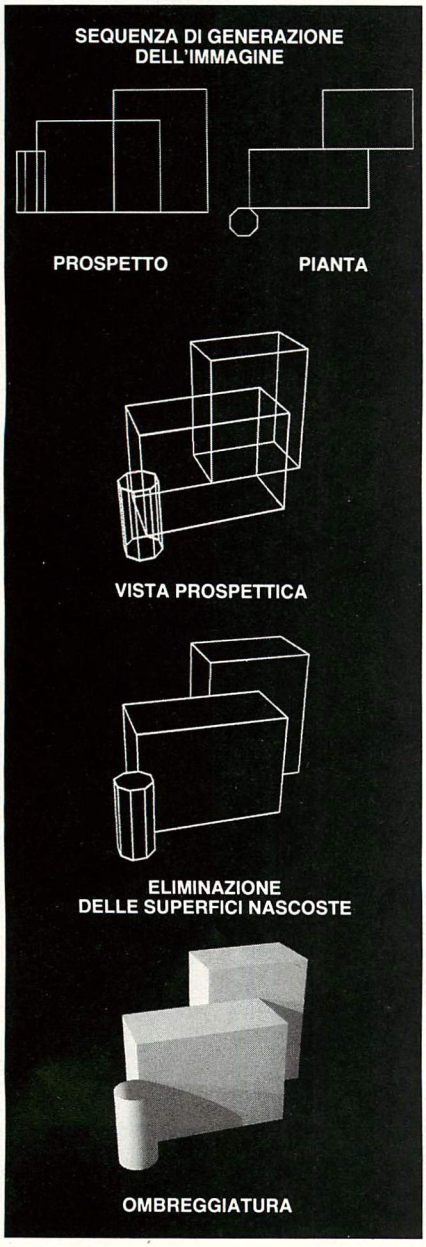
La progettazione architettonica parte da semplici schizzi e, attraverso livelli crescenti di dettaglio, giunge ai disegni esecutivi in base ai quali è costruita la struttura (qui il Theory Center della Cornell University). Nuovi hardware e software sono in grado di agevolare tutto il procedimento, tranne le primissime fasi.





Questi sofisticati programmi di grafica al calcolatore (eidomatica), che sono già impiegati nei laboratori di ricerca e nei corsi di progettazione architettonica della Cornell University, forniscono immagini che per architetti e clienti sono molto più utili dei disegni e dei modelli impiegati oggi. Le immagini riescono a riprodurre le più lievi sfumature di luci e ombre e, cosa essenziale per capire come si presenterà il progetto ultimato, possono essere presentate in rapida successione, dando così all'osservatore l'impressione di muoversi entro l'edificio come se esso fosse già costruito.

Il software per l'architettura deve adeguarsi alle peculiarità e alle originalità che caratterizzano la progettazione architettonica. Cosa ancora più importante, il progetto è iterativo: l'architetto che nel perfezionare un progetto s'imbatta in un ostacolo invalicabile deve retrocedere a una fase precedente e riconsiderare le proprie decisioni iniziali. Da una fase all'altra la forma di comunicazione subisce sottili modifiche. Scarabocchi su carta da lucido o schizzi su buste usate rappresentano i primi passi del processo, mentre nelle fasi successive vengono aggiunti particolari sempre più precisi via via che si fissano le aree e le dimensioni, e la matita cede il passo all'inchiostro. Nei disegni vengono inseriti gli elementi usuali: porte, finestre, tratti di parete.



La fase preliminare del progetto si concentra sulle dimensioni e sulla scala dell'edificio e sui suoi rapporti con le strutture vicine già esistenti. Si moltiplicano gli studi per precisare la forma essenziale e la composizione della struttura e per garantire il soddisfacimento delle specifiche progettuali, per esempio il numero di metri quadrati da assegnare alle diverse parti dell'edificio. La fase successiva, di sviluppo, comprende il perfezionamento di piante, prospetti e sezioni, i flussi del traffico, la distribuzione degli spazi pubblici e privati e la pianta delle singole stanze. La terza fase, che è la più costosa in termini di tempo e di denaro, è quella del progetto esecutivo, costituito da un insieme di disegni dettagliati che forniscono le dimensioni esatte e le specifiche dei materiali necessari alla costruzione vera e propria dell'edificio. Questi disegni garantiscono anche l'osservanza delle norme costruttive e dei vincoli posti dal bilancio preventivo e cautelano l'architetto da controversie contrattuali.

I programmi oggi in commercio per la produzione efficiente di progetti esecutivi sono troppo rigidi per consentire una progettazione iterativa e non sono utili per scarabocchiare perché richiedono troppe informazioni in forma troppo precisa. Inoltre, in genere, il software per disegnare non è fatto per produrre prospettive di elevata qualità da cui si possa ricavare l'impressione che daranno nella realtà gli spazi dell'edificio.

Per tradizione, questo compito è affidato ad accurati modelli fisici in scala. Questi modelli sono costosi e poco flessibili e in genere riescono solo a dare un'immagine a volo d'uccello di un edificio o di un interno. Non riescono certo a dare all'architetto o al cliente il senso reale che della prospettiva, dei colori, delle superfici e delle ombre avrebbe chi si muovesse nella costruzione ultimata.

Questo lo può fare solo l'eidomatica. Gli straordinari progressi compiuti nell'ultimo decennio dal software e dall'hardware consentono di generare immagini a colori di scene complesse con una velocità sufficiente a simulare il movimento. Questo software di simulazione può creare immagini prospettiche di ambienti complessi costruiti con materiali specifici di aspetto e colore particolari: cemento, acciaio, vetro e tessuto. Gli algoritmi per la sintesi delle immagini sono oramai abbastanza progrediti per riprodurre sfumature anche tenui di luci e ombre. Potenti stazioni di lavoro che dispongano di questi algoritmi consentono agli architetti di vedere immediatamente i risultati delle loro decisioni progettuali e di modificare i progetti in modo interattivo.

L'immagine di una scena viene prodotta in cinque tappe. In primo luogo l'architetto deve definire gli oggetti presenti, la loro forma, posizione e orientazione, le loro caratteristiche materiali e la finitura delle superfici. La seconda fase consiste nella scelta di un punto di vista: ciò equivale al posizionamento di una macchina fotografica e alla scelta e alla messa a fuoco dell'obiettivo. A questo punto il calcolatore trasforma i dati relativi agli oggetti e ne fornisce un'immagine prospettica.

La terza fase consiste nello stabilire quali superfici siano visibili all'osservatore. Nel mondo reale sono le leggi fisiche a risolvere questo problema, ma nelle scene prodotte dal calcolatore sono necessari lunghi calcoli per risolvere il cosiddetto problema delle superfici nascoste. Tutti gli oggetti della scena devono essere controllati per scoprirne le eventuali sovrapposizioni. Se c'è una sovrapposizione, va mostrato solo l'oggetto più vicino all'osservatore.

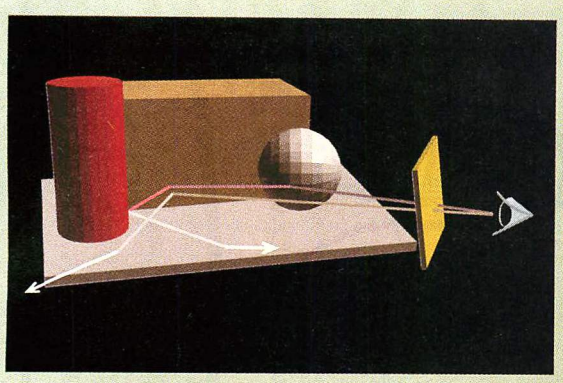
La quarta fase consiste nel simulare l'illuminazione. La luce incidente su una qualunque superficie della scena è una combinazione di quella proveniente direttamente dalle sorgenti (la cui posizione, come quella degli altri oggetti della scena, è stata già determinata) e di quella riflessa dalle altre superfici (illuminazione indiretta). L'intensità della luce che raggiunge l'osservatore dipende inoltre dalla luce incidente su ciascuna superficie e dalle qualità riflettenti di questa. Per semplificare l'ottenimento della rappresentazione prospettica, molti sistemi calcolano soltanto l'illuminazione diretta delle superfici.

L'ultima fase è quella della presentazione. Il software per la rappresentazione prospettica deve determinare l'intensità della luce che dalla scena reale giungerebbe all'occhio dell'osservatore e generare un'immagine che produca lo stesso effetto visivo. I colori e le intensità scelte dal software possono variare a seconda che l'immagine debba essere rappresentata su uno schermo, stampata oppure proiettata da una diapositiva a colori.

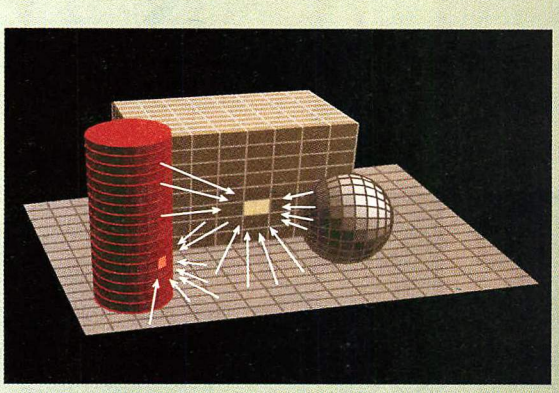
Le moderne stazioni di lavoro eidomatiche a elevate prestazioni sono provviste di un hardware specializzato che determina direttamente le trasformazioni di prospettiva, le superfici visibili e i sottoprogrammi di presentazione. Questo hardware può anche eseguire gli algoritmi necessari a simulare la semplice illuminazione diretta. Le stazioni di lavoro effettuano i calcoli eidomatici con velocità abbastanza elevata da consentire agli architetti di simulare i progetti e di valutarli agevolmente fin dalle prime fasi.

Tuttavia la qualità delle immagini generate dalle stazioni di lavoro è in genere modesta. Ci si accorge facilmente che le immagini sono state prodotte da un cal-

DUE METODI PER LA SIMULAZIONE DI LUCI E OMBRE



Nel metodo di tracciamento di raggi (*ray tracing*) per la generazione di immagini al calcolatore si fanno partire raggi di luce immaginari dal punto di vista dell'osservatore verso la scena che deve essere riprodotta. L'intensità cromatica e quella luminosa in ogni punto dell'immagine dipendono dalla riflettività delle superfici incontrate dal raggio nel suo passaggio attraverso la scena.



L'algoritmo della *radiosity* calcola l'intensità della luce riflessa da ogni superficie di una scena come funzione dell'intensità luminosa di tutte le altre superfici. Una volta risolto l'insieme di equazioni simultanee così ottenute, la scena può essere ripresentata rapidamente sotto qualunque angolo visuale.

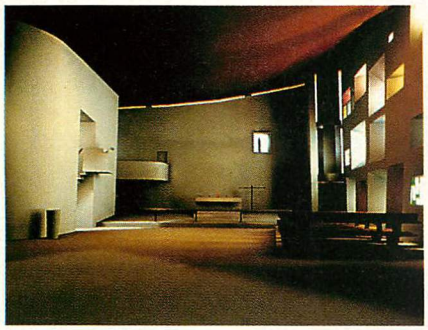
colatore perché mancano gli effetti delle riflessioni di un oggetto sull'altro. Di conseguenza esse sono utili soprattutto nelle prime fasi della costruzione del modello. Per poter valutare il progetto sono necessarie immagini molto più realistiche, generate da programmi più raffinati. Inoltre queste immagini debbono essere presentate in rapida successione, in modo da dare l'illusione del movimento.

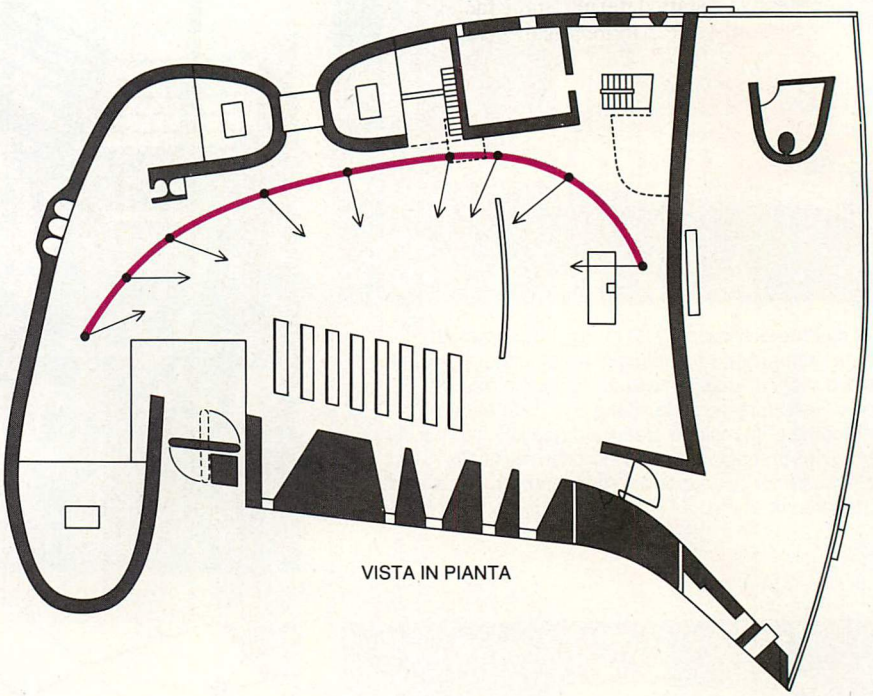
I ricercatori che si occupano di eidomatica hanno dedicato e dedicano molto impegno al problema dell'illuminazione. Nelle scene reali gli effetti dell'illuminazione e della riflessione della luce sono molto complicati e sfuggenti. Simulare l'illuminazione indiretta è particolarmente difficile. Benché sia possibile scrivere equazioni che simulano correttamente questa illuminazione complessiva, il tempo di calcolo richiesto per risolverle è eccessivo.

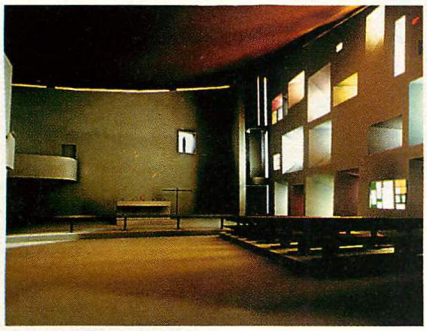
Oggi gli esperti di eidomatica ricorrono molto spesso a due scorciatoie: il tracciamento di raggi (*ray tracing*) e la *radiosity*, due metodi di costruzione di immagini quasi diametralmente opposti. Il tracciamento di raggi tiene conto soltanto della luce che raggiunge l'occhio dell'osservatore ed è adatto soprattutto agli ambienti che contengono superfici molto riflettenti. La *radiosity*, invece, consente di determinare la distribuzione dell'energia luminosa in tutta la scena ed è più adatta agli ambienti che contengono soprattutto superfici opache.

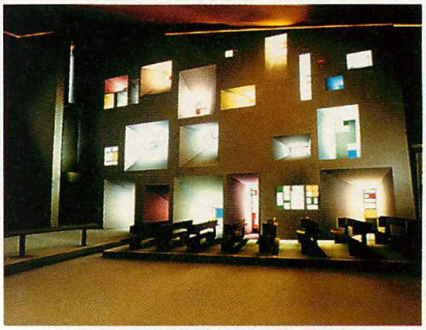
Benché il tracciamento di raggi fornisca immagini di straordinario realismo e possa essere benissimo impiegato ai fini della presentazione architettonica, la sua utilità per la valutazione dei progetti è limitata. È un metodo che dipende dal punto di vista e quindi, se questo cambia, occorre ripetere tutto il calcolo. Gli algoritmi per il tracciamento di raggi sono troppo lenti per generare successioni dinamiche di immagini capaci di dare l'impressione di muoversi in uno spazio.

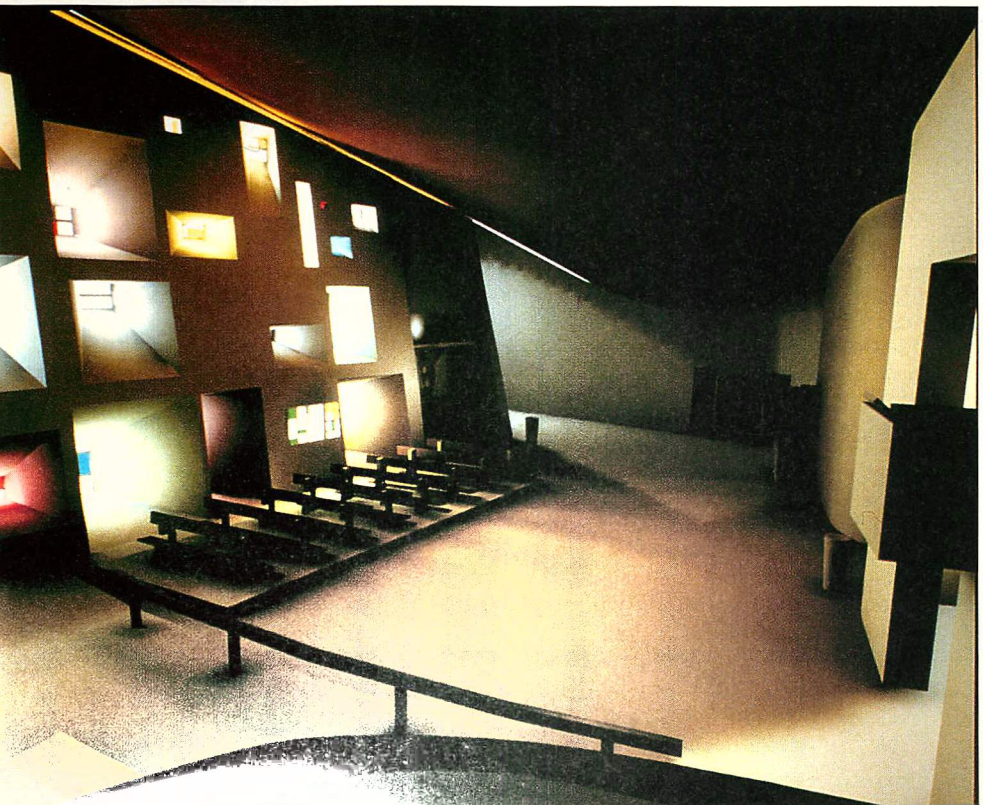
UNA VISITA ALLA CAPPELLA DI LE CORBUSIER A RONCHAMPS

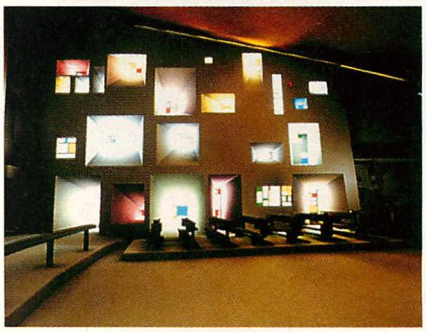












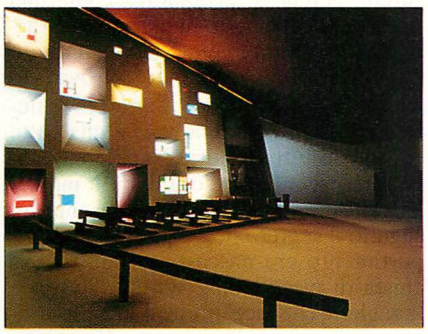
I modelli al calcolatore danno all'osservatore l'impressione di muoversi nello spazio architettonico. Stazioni di lavoro ad alte prestazioni con opportuni programmi sono in grado di produrre ogni secondo parecchie vedute prospettiche di una struttura da un punto di osservazione qualsiasi. Queste «passeggiate» sono utili per valutare strutture ancora da costruire e per analizzare edifici esistenti. In alto il percorso della visita è indicato in rosso e le frecce partono dal punto di vista.

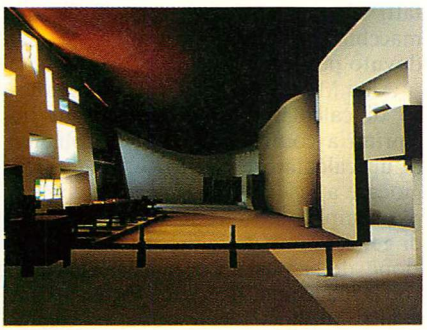
Il metodo della *radiosity*, messo a punto alla Cornell University nel 1984, non dipende invece dal punto di vista: per ciascuna scena i calcoli vengono eseguiti solo una volta. Quando l'illuminazione complessiva è stata determinata, è facile generare una serie di immagini da diversi punti di vista. Per di più, l'algoritmo può generare le immagini a una velocità tale da dare l'illusione del movimento.

Il tracciamento di raggi inverte le leggi ordinarie della propagazione della luce. Nella realtà i raggi luminosi sono diffusi da ciascuna sorgente di luce e sono riflessi dalle superfici presenti nella scena; alla fine una piccola parte di tutti i raggi luminosi giunge all'occhio dell'osservatore. Gli algoritmi per il tracciamento di raggi invertono questo processo: partono dall'occhio e, dopo aver attraversato la scena, giungono alle superfici e alle altre sorgenti di raggi luminosi.

Il metodo più diffuso per simulare l'illuminazione complessiva mediante il tracciamento di raggi fu ideato nel 1979 da Turner Whitted dei Bell Laboratories. Esso traccia la traiettoria di un singolo raggio dall'occhio all'ambiente attraverso ciascun punto del piano immagine (per esempio ogni pixel - elemento d'immagine - sullo schermo di una stazione di lavoro). Quando colpisce una superficie, il raggio genera raggi riflessi o rifratti, che sono a loro volta tracciati per determinare le superfici che intersecano. L'intensità complessiva di ciascun pixel è determinata sommando i contributi luminosi di ciascun raggio generato.

Il colore e la grana delle immagini prospettiche prodotte dal calcolatore (qui un ipotetico museo di arte moderna costruttivista) possono essere modificati in modo semplice e rapido. Con una spesa minima, gli architetti e i loro clienti sono messi in grado di valutare diverse scelte dei materiali da costruzione e le diverse combinazioni cromatiche.





Il metodo della *radiosity*, basandosi sulla conservazione dell'energia, consente di determinare con precisione l'intensità luminosa di ciascuna superficie in una scena composta da emettitori e riflettori ideali diffusi. Si può scrivere un'equazione che esprime la *radiosity* di ciascuna superficie della scena (cioè l'intensità della luce emessa dalla superficie) in funzione della *radiosity* di tutte le altre superfici. La *radiosity* di un oggetto dipende da due fattori: l'emissione (se l'oggetto è una sorgente luminosa) e la riflessione della luce incidente. A sua volta la luce incidente dipende dall'emissione di tutte le sorgenti luminose dell'ambiente e dalla riflessione di tutte le altre superfici.

I valori di *radiosity* di tutte le superfici sono quindi espressi in forma di una matrice di equazioni simultanee, che si possono risolvere per ricavare il valore dell'illuminazione in qualunque zona della scena. Oggi i calcoli si possono eseguire solo per ambienti diffusi, perché per configurazioni di emissione o riflessione complesse le equazioni sono troppo difficili per essere risolte rapidamente.

Il metodo della *radiosity* non è solo veloce, ma anche molto preciso. Può riprodurre fenomeni come le frange cromatiche, in cui le riflessioni da una superficie rossa possono far apparire rosa una superficie bianca adiacente, le variazioni di tonalità di colore per effetto delle ombre e le sfocature ai margini delle ombre prodotte da sorgenti luminose estese.

I sistemi per la progettazione assistita da calcolatore possono già oggi produrre i tipi di immagine di cui gli architetti hanno bisogno. Il problema più importante che resta ancora da risolvere è di un software che sia in grado di aiutare gli architetti nella realizzazione di modelli.

Solamente ora, d'altra parte, i ricercatori hanno iniziato a occuparsi delle operazioni necessarie alla progettazione di un edificio: generare le forme, specificare le caratteristiche delle superfici, collegare gli oggetti senza soluzioni di continuità.

Non è inverosimile che i primi schizzi grossolani di un progetto continueranno a venire ancora eseguiti a mano, ma nel prossimo decennio verranno sicuramente allestiti programmi di facile apprendimento e utilizzazione, e tuttavia abbastanza potenti da consentire di padroneggiare il progetto di interi edifici fino nei minimi particolari, e capaci di generare realistiche immagini in movimento.

(Da «Le Scienze» n. 272, aprile 1991.)

DONALD P. GREENBERG *è direttore del programma di grafica al calcolatore della Cornell University, presso la quale insegna architettura.*

Il calcolatore Grande Maestro di scacchi

di Feng-hsiung Hsu, Thomas Anantharaman, Murray Campbell e Andreas Nowatzyk

Calcolatori capaci di giocare a scacchi sono oggi in grado di battere giocatori di tutti i livelli di abilità

Nel gennaio 1988, durante una conferenza stampa tenuta a Parigi dal campione del mondo di scacchi Gary K. Kasparov, un giornalista chiese se un calcolatore sarebbe stato in grado di sconfiggere un grande maestro prima della fine del secolo. Senza indugio Kasparov rispose: «Certamente no, e se qualche Grande Maestro avesse davvero difficoltà a giocare contro un calcolatore sarei felice di dargli qualche consiglio».

Dieci mesi dopo questa affermazione di Kasparov, in un importante torneo tenutosi a Long Beach, in California, il Grande Maestro Bent Larsen, che era stato in lizza per il titolo mondiale, fu sconfitto da un calcolatore da noi ideato alla Carnegie-Mellon University. Oltre a questo incontro, *Deep Thought*, una combinazione di software e di hardware dedicato, vinse altre cinque partite, ne pareggiò una e una ne perse, conquistando in tal modo il primo posto *ex aequo* con il Grande Maestro Anthony Miles. Dato che per regolamento un calcolatore non può vincere denaro in un torneo, Miles intascò tutti i 10 000 dollari del primo premio. (Tuttavia Deep Thought lo sconfisse un anno dopo in una partita di esibizione.)

Entro l'estate 1990 - durante la quale tre fondatori del gruppo Deep Thought sono entrati a far parte della IBM - il calcolatore aveva vinto cinque delle 10 partite disputate in torneo contro Grandi Maestri e 12 delle 14 partite giocate contro Maestri Internazionali. Alcuni di questi incontri e decine di altri che hanno opposto il calcolatore ad avversari di livello inferiore sono stati giocati sotto gli auspici della US Chess Federation, che ha attribuito a Deep Thought una valutazione Elo di 2552. [È da notare tuttavia che la scala statunitense sopravvaluta i punteggi di circa 100 punti rispetto a quella della FIDE (Fédération Internationale des Échecs).] Questa valutazione pone Deep Thought fra i Grandi Maestri di livello più basso, ma è comunque molto superiore a quella di un giocatore medio di torneo, che in genere raggiunge un punteggio che si aggira intorno a 1500. Nelle partite disputate successivamente all'agosto 1988, quando il calcolatore è stato portato alla sua attuale velocità di analisi di 750 000 posizioni al secondo, la sua valutazione Elo è stata superiore a 2600.

Il modello perfezionato del nostro calcolatore, che si prevede disputerà le sue prime partite nel 1992, sarà dotato di un hardware molto più potente che aumenterà di oltre 1000 volte la velocità di analisi, fino a circa un miliardo di posizioni al secondo. Questa sola modifica potrebbe rendere il discendente di Deep Thought addirittura più forte di Kasparov o di qualunque altro giocatore della storia.

Ma perché si insegna a una macchina come minacciare un re di legno su una scacchiera? In primo luogo gli scacchi vengono tradizionalmente considerati in Occidente come il principale gioco di intelligenza; per dirla con Goethe, sono «la pietra di paragone dell'intelletto». Secondo alcuni, la costruzione di un calcolatore in grado di giocare bene a scacchi dimostrerebbe che è possibile mettere a punto modelli dei processi di pensiero o, viceversa, che in questo gioco non è necessario pensare. Sia l'una sia l'altra conclusione imporrebbero di rivedere ciò che si intende comunemente per intelligenza.

Oltre a ciò, un calcolatore che giochi a scacchi costituisce un problema tecnico appassionante, come scrisse 40 anni fa su «Scientific American» Claude E. Shannon, il padre della teoria dell'informazione: «Si studia il problema del gioco degli scacchi al fine di sviluppare tecniche che possano essere sfruttate per applicazioni più pratiche. Il calcolatore che gioca a scacchi rappresenta un punto di partenza ideale per diverse ragioni. Il problema è definito nettamente, sia nelle operazioni permesse (le mosse degli scacchi) sia nell'obiettivo finale (lo scacco matto); inoltre, non è tanto semplice da essere banale né tanto complesso da rendere impossibile una soluzione soddisfacente. E organizzando una partita fra una macchina del genere e un giocatore si può avere una chiara indicazione della capacità del calcolatore in questo tipo di ragionamento.»

Forse la conseguenza pratica più importante di questi studi è stata la dimostrazione dell'efficacia dell'analisi al calcolatore; il perfezionamento delle relative tecniche porterà senza dubbio a progressi nei settori della progettazione di reti, della messa a punto di modelli di reazioni chimiche e anche dell'analisi linguistica.

La storia delle macchine che giocano a scacchi iniziò negli anni successivi al 1760, allorquando il barone Wolfgang von Kempelen presentò in Europa il suo automa, che venne soprannominato «il turco» perché si presentava come una marionetta con tanto di mustacchi e turbante, apparentemente azionata da un complicato meccanismo che si trovava in un compartimento sottostante. In genere il congegno giocava bene e una volta mandò su tutte le furie Napoleone Bonaparte sconfiggendolo in 19 mosse. Edgar Allan Poe, fra gli altri, scoprì in seguito il segreto dell'automa: nel compartimento era nascosto un abile scacchista di piccolissima statura. Tuttavia la ragione che fece intuire a Poe l'imbroglio era erronea: lo scrittore affermò infatti che se si fosse trattato di una macchina autentica, non avrebbe mai dovuto perdere!

Alan M. Turing, matematico, studioso di calcolatori e crittografo, fu tra i primi a confrontarsi con il problema di un calcolatore che fosse in grado di giocare a scacchi, ma si accorse che era più semplice attuare il suo programma di generazione delle mosse e di valutazione della posizione a mano anziché con la macchina. Il tedesco Konrad Zuse e altri studiosi fecero tentativi analo-

Il campione del mondo Gary Kasparov con un IBM PS/2 usato per comunicare con Deep Thought, prima di una partita disputata alla fine del 1989. Kasparov vinse facilmente sebbene la macchina sia considerata a livello di Grande Maestro.

ghi, ma l'opera fondamentale fu quella di Shannon. Egli prese le mosse dalle scoperte di John von Neumann e Oskar Morgenstern che, nella loro teoria generale dei giochi, avevano escogitato un algoritmo «minimax» mediante il quale era possibile determinare la mossa migliore.

Essenzialmente, l'algoritmo determina tutte le possibili posizioni risultanti dopo un certo numero di mosse dei due giocatori, assegna loro un valore numerico e, in funzione di questi valori, stabilisce quale sia la mossa migliore. All'inizio il generatore di mosse calcola tutte le mosse possibili per il calcolatore a partire dalla posizione in corso, poi tutte le possibili risposte dell'avversario e così di seguito. L'algoritmo esamina pertanto un albero di gioco, nel quale ciascuna posizione è connessa alle posizioni successive consentite dalle regole del gioco.

A ciascun livello dell'albero vi è un numero di posizioni circa 38 volte superiore a quello del livello precedente (38 è il numero medio di mosse possibili in una tipica posizione di gioco), oppure circa sei volte superiore se si utilizza la «potatura alfa-beta».

La maggior parte delle posizioni si trova pertanto alle estremità dei rami dell'albero, dove esso continua a crescere fino a quando l'analisi non sia completata, oppure il tempo a disposizione del calcolatore non sia scaduto. Una funzione di valutazione assegna quindi un punteggio a ciascuna posizione finale, attribuendo per esempio un 1 a uno scacco matto ai danni dell'avversario, un − 1 a uno scacco matto ai danni della macchina e uno 0 a una patta. È anche possibile considerare e confrontare situazioni meno nette: per esempio il calcolatore può tener conto della qualità (ossia il valore dei pedoni e delle figure) e calcolare il valore delle posizioni in base a parametri che definiscono la disposizione delle figure, lo schieramento dei pedoni, l'occupazione di una colonna aperta, il controllo del centro e così via.

Si può migliorare il gioco di un calcolatore aumentandone la profondità d'analisi (ossia il numero di semimosse che esso considera prima di valutare le posizioni) o perfezionandone la funzione di valutazione. La macchina giocherebbe in maniera perfetta se fosse in grado di esaminare in modo esaustivo tutte le possibili successioni di mosse fino al matto di una delle due parti o alla patta. Una macchina siffatta potrebbe allora sorprendere l'avversario annunciando già alla prima mossa: «Il bianco muove e vince in 137 mosse» oppure giudicando la posizione insostenibile e abbandonando. Ma, se l'analisi esaustiva è facile in giochi come il filetto, è impossibile negli scacchi, dove si possono avere 10^{120} partite diverse. Un gioco egualmente perfetto potrebbe nascere dall'esame di un solo livello dell'albero, ammesso che la valutazione delle posizioni fosse di livello pari a quella rivendicata da Capablanca, il quale affermava di prevedere una sola mossa: la migliore.

I primi studiosi a occuparsi di questo settore erano ben lungi dall'avanzare pretese del genere, dato che fino al

1958 non si era neppure in grado di programmare macchine che rispettassero le regole degli scacchi. Dovevano infatti passare altri otto anni prima che il programma MacHack-6, ideato da Richard D. Greenblatt del Massachusetts Institute of Technology, riuscisse a raggiungere il livello del giocatore medio di torneo.

Gli autori di programmi per gli scacchi, via via più numerosi, cominciarono a dividersi in due fazioni dalle filosofie distinte, che potremmo chiamare degli «strateghi» e dei «tecnici». I primi affermavano che un calcolatore dovrebbe giocare a scacchi allo stesso modo di una persona, decidendo le mosse per mezzo di ragionamenti espliciti, mentre i tecnici adottavano un atteggiamento meno rigido, sostenendo che un tipo di ragionamento valido per gli esseri umani potrebbe non essere applicabile a una macchina. Agli inizi, quando la progettazione di calcolatori capaci di giocare a scacchi era più una questione teorica che pratica, gli strateghi sembrarono avere il sopravvento.

La fazione dei tecnici divenne protagonista negli anni settanta, quando si scoprì che le prestazioni dei programmi erano quasi proporzionali alla profondità di analisi: a ogni livello aggiuntivo dell'albero di gioco che viene esaminato l'Elo aumenta di 200 punti (*si veda l'illustrazione in queste due pagine*). I programmatori si affannarono allora per avere accesso a calcolatori sempre più veloci e applicarono tutti i trucchi del mestiere per ottenere una maggiore profondità d'analisi dalla potenza di calcolo disponibile.

Tuttavia, mettere a punto la ricerca delle posizioni non basta. I primi programmi per gli scacchi generavano le posizioni senza alcun discernimento: consideravano, per esempio, distinte successioni che, per inversione di due mosse, portavano alla medesima posizione. Queste operazioni ridondanti vengono attualmente evitate conservando le posizioni in matrici di memoria. Questo stratagemma facilita anche il processo di potatura dell'albero di gioco, in quanto consente di scartare immediatamente numerose successioni di mosse prive di interesse.

Il problema più arduo è quello di stabilire fino a quale profondità occorra esaminare una diramazione dell'albero di gioco. Non è certo possibile continuare l'analisi indefinitamente, ma sarebbe comunque auspicabile non interromperla in una posizione «instabile», come quella che si ha nel bel mezzo di uno scambio di pezzi. Si supponga, per esempio, che il calcolatore esamini otto semimosse per ciascuna diramazione e arrivi a una posizione, dopo l'ottava semimossa, in cui esso apparentemente guadagna un cavallo in cambio di un pedone. Anche se con la mossa immediatamente successiva l'avversario potesse recuperare il cavallo e ottenere il guadagno netto di un pedone il calcolatore perseguirebbe ostinatamente il vantaggio illusorio suggeritogli dal calcolo.

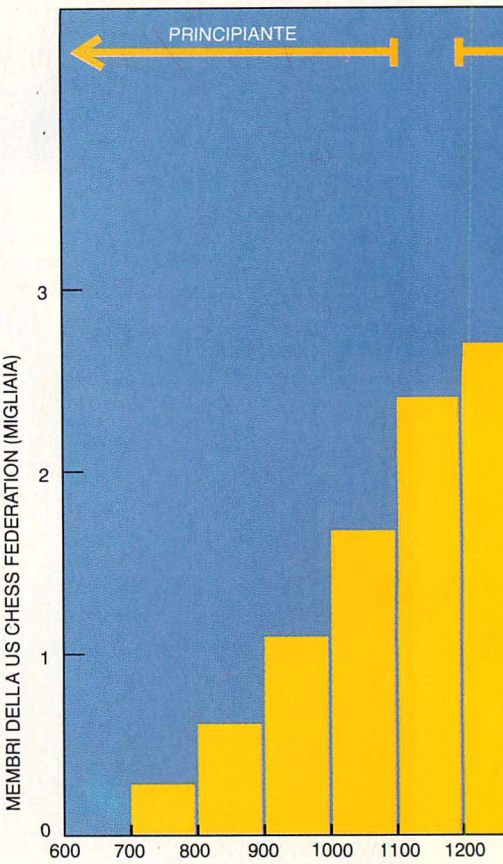
Questo «effetto orizzonte», come viene chiamato, spinge spesso i calcolatori a commettere una sorta di suicidio scacchistico che non si osserva neppure in partite tra giocatori alle prime armi: all'improvviso e senza alcuna ragione apparente, la macchina comincia a sacrificare pedoni e figure, riducendosi in breve in una posizione insostenibile. Per diminuire la probabilità di errori di questo tipo, virtualmente tutti i programmi attuali comprendono una fase aggiuntiva di ricerca delle posizioni stabili, il cui scopo è esaminare una sequenza di cattura di pezzi fino al raggiungimento di una posizione stabile che consenta di applicare in un contesto non fuorviante la funzione di valutazione.

Negli anni settanta e agli inizi degli anni ottanta si assistette al predominio delle macchine che si basavano sulla «forza bruta», nel senso che il loro successo era dovuto a un'abile attuazione delle strategie di ricerca e analisi delle posizioni descritte in precedenza. Questo periodo fu dominato quasi ininterrottamente dal programma Chess 4.0 della Northwestern University e dai programmi 4.X da esso derivati. Via via adattati alle nuove generazioni di calcolatori, questi programmi sono andati migliorando costantemente il loro punteggio nella scala di valutazione fino a superare nel 1979 il livello di Esperto (2000 punti).

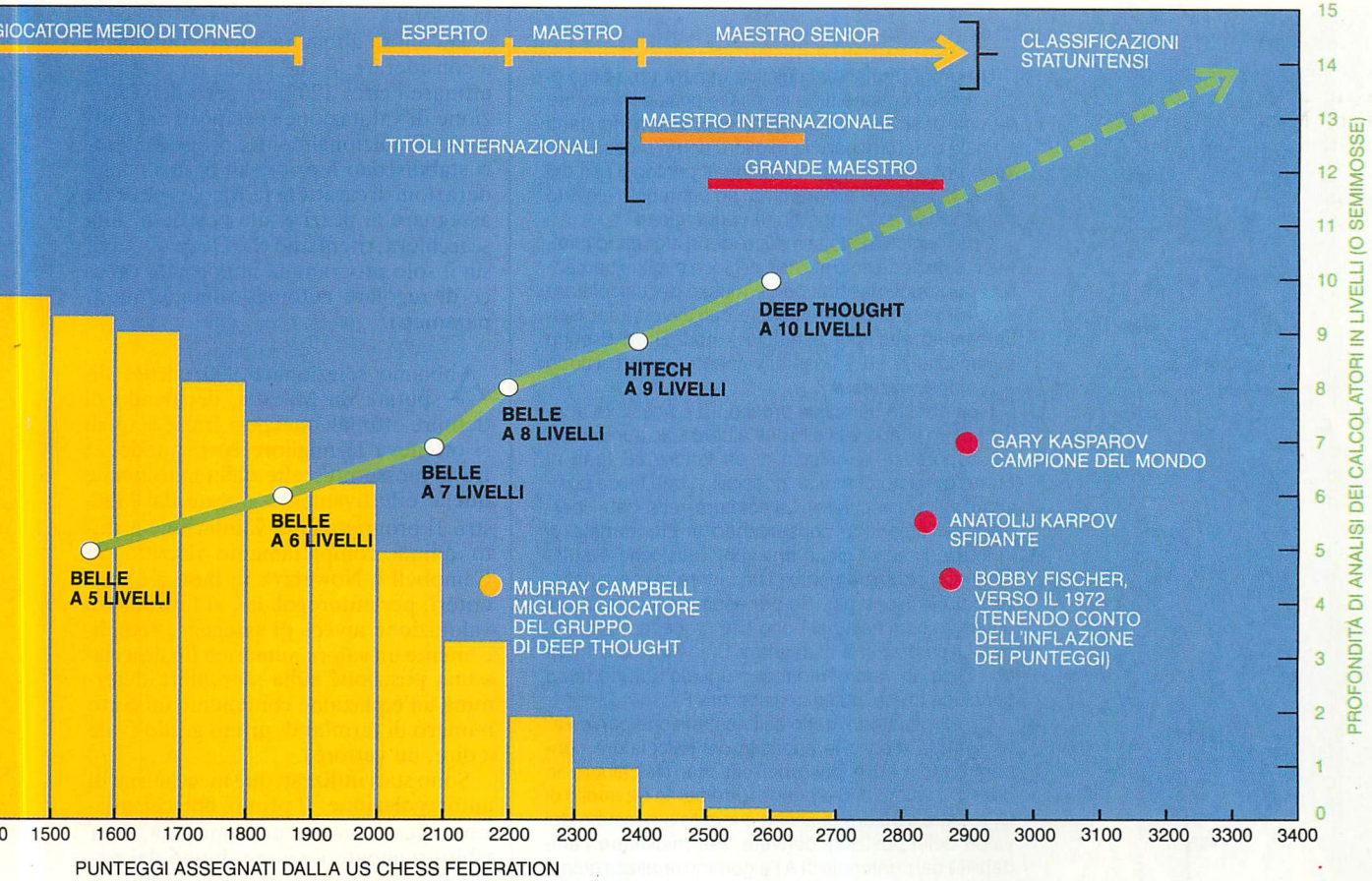
Sempre negli anni settanta si sono avuti diversi tentativi di costruire calcolatori dedicati per il gioco degli scacchi. Il più famoso, Belle, realizzato presso gli AT&T Bell Laboratories, raggiunse il livello di Maestro (2200 punti) nel 1983. L'apogeo dell'era delle macchine che si basavano sulla forza bruta si ebbe nel 1986 con l'emergere di Cray Blitz, un programma ideato per i supercalcolatori Cray, e di Hitech, una macchina dedicata che calcolava le successioni di mosse per mezzo di 64 microelaboratori (uno per ciascuna casella della scacchiera). Hitech vinse nel 1985 il Campionato di scacchi nordamericano per calcolatori, mentre l'anno successivo Cray Blitz divenne campione del mondo fra i calcolatori, battendo proprio Hitech nella «bella» per il titolo. Cray Blitz e Hitech erano in grado di esaminare rispettivamente 100 000 e 120 000 posizioni al secondo.

La storia di Deep Thought è piuttosto singolare. In primo luogo, questa macchina è stata sviluppata da un gruppo di studenti specializzandi senza alcun appoggio ufficiale o supervisione diretta di membri della Carnegie-Mellon University. (Il gruppo di ricerca che lavora sui calcolatori che giocano a scacchi presso questa università non ha alcuna connessione con gli ideatori di Deep Thought.) In secondo luogo, i membri del gruppo non hanno tutti la stessa formazione e probabilmente proprio questa circostanza ha consentito loro di affrontare il problema in maniera originale.

Nel giugno 1985 uno di noi (Hsu) scoprì che sarebbe stato possibile costruire un generatore di mosse su un singolo chip sfruttando le tecnologie di integrazione su grandissima scala (VLSI) fornite alla comunità scientifica dalla Defense Advanced Research Programs Agency (DARPA). Hsu trasse ispirazione per il suo chip dal generatore di mosse di Belle, ma vi introdusse diversi perfezionamenti per rendere il progetto compatibile con le tecnologie VLSI. Il chip venne concepito in modo che i componenti elettronici (fra cui 35 925 transistori) potessero essere sistemati sulla superficie più piccola possibile, nonostante la mediocre qualità del silicio fornito dalla MOSIS, la società che offriva i servizi di fabbricazione per i



La crescente competitività dei calcolatori è chiara in questo confronto fra i punteggi dei 35 000 membri della US Chess Federation e quelli di macchine con diverse profondità di analisi (*in verde*). I calcolatori guadagnano circa 200 punti per ciascuna semimossa, o livello dell'albero di gioco, in più che esaminano. Deep Thought analizza 10 livelli e ha un punteggio di circa 2600; esaminando 14 o 15 livelli si potrà ottenere una valutazione di gran lunga superiore.



progetti sovvenzionati dalla DARPA (la dimensione minima di un componente era di tre micrometri). Hsu impiegò sei mesi per il lavoro di progettazione, verifica e messa a punto, ma poi dovette aspettare altri quattro mesi prima di ricevere i primi esemplari funzionanti. Il collaudo del chip fu eseguito collegandolo a una stazione di lavoro scientifica; riuscimmo così ad appurare che esso era in grado di elaborare più di due milioni di mosse al secondo, a una velocità oltre 10 volte maggiore della schiera di 64 microelaboratori dell'Hitech.

A questo punto Hsu iniziò a collaborare con Thomas Anantharaman, che all'epoca si stava specializzando in scienza dei calcolatori presso il gruppo di ricerca sul riconoscimento del linguaggio della Carnegie-Mellon University. Anantharaman aveva scritto un proprio programma per gli scacchi che generava le mosse attraverso un pacchetto di software. Sostituendo quest'ultimo con il congegno messo a punto da Hsu, Anantharaman riuscì a migliorare del 500 per cento la velocità di analisi del programma, giungendo fino a 50 000 posizioni al secondo.

Hsu e Anantharaman, ringalluzziti dal successo, decisero di preparare la macchina per farla partecipare all'edizione 1986 del Campionato nordamericano di scacchi per calcolatori, che doveva avere inizio di lì a sette settimane. Murray Campbell e Andreas Nowatzyk, che si stavano specializzando in scienza dei calcolatori, vennero chiamati a far parte del gruppo. Era importante poter disporre di una funzione di valutazione più raffinata e Campbell, che aveva esperienza di gioco agonistico, accettò di farsene carico. Il secondo e più impegnativo compito, data la limitatezza del tempo disponibile, era quello di potenziare il congegno in modo che potesse fungere da semplice strumento di ricerca, al fine di sfruttare più a fondo di quanto non fosse possibile con la stazione di lavoro la velocità potenziale del chip generatore di mosse.

Hsu dovette adottare misure draconiane per poter ultimare il progetto in tempo utile, tanto da decidere che la macchina avrebbe ignorato due regole fondamentali degli scacchi: l'arrocco e la patta per ripetizione della posizione. (Si ha questo esito quando in una partita una stessa posizione si ripresenta per tre volte e la mossa tocca sempre al medesimo giocatore.) Per compensare almeno in parte queste omissioni adottammo una strategia di ricerca ibrida: i primi livelli dell'albero di gioco venivano esaminati da un calcolatore ausiliario, che tenesse conto dell'arrocco e della patta per ripetizione della posizione, mentre i livelli successivi (che ovviamente comprendevano la maggior parte delle posizioni) venivano analizzati dalla nostra macchina.

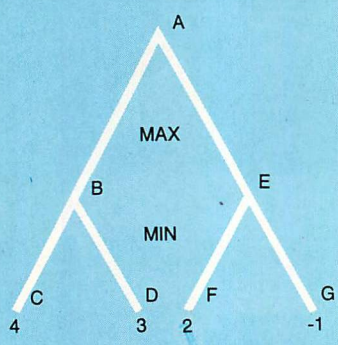
Data la scarsità di fondi, realizzammo la nostra prima macchina, ChipTest, utilizzando componenti e sistemi che facevano parte di altri progetti; il valore complessivo degli elementi non superava i 500 dollari (1000 tenendo conto del costo dei chip costruiti con i fondi della DARPA). Ma né il nostro congegno né il calcolatore ausiliario erano perfettamente a punto all'inizio del campionato, sicché ChipTest riuscì soltanto a pareggiare vittorie e sconfitte. Non si trattava in ogni caso di un risultato scadente, per sole sette settimane di lavoro.

Questa esperienza ci permise di imparare molte cose. Hsu osservò, per esempio, che altri due programmi partecipanti al campionato si erano impegnati in linee di gioco in cui tutte le mosse apparivano forzate e nessuna delle due parti poteva prevedere l'esito finale. In altri termini, il programma che otteneva un vantaggio lo doveva unicamente al caso.

Hsu avanzò allora la proposta di correggere questo difetto con quello che egli ha battezzato algoritmo di estensione particolare: nel caso in cui il calcolatore trovi una sola risposta adeguata, l'analisi viene spinta a una profondità ancora superiore, allo scopo di studiare con particolare attenzione le posizioni critiche.

Quando uno dei giocatori sta per catturare un alfiere intrappolato, per esempio, il difensore ha a disposizione un numero sempre minore di mosse corrette via via che la profondità di analisi aumenta; alla fine vi è una sola risposta possibile, dopo di che l'alfiere è perso. L'algoritmo di estensione particolare si

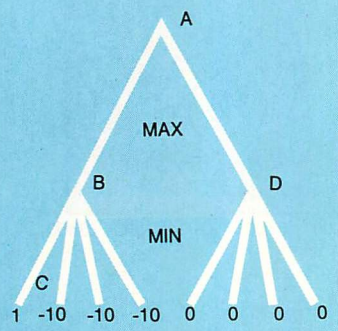
L'ANALISI DELL'ALBERO DI GIOCO



Un programma scacchistico genera un albero di gioco che contiene tutte le mosse possibili a partire da una posizione data, valuta le posizioni risultanti e risale a determinare la migliore prima mossa. Alle varie posizioni vengono assegnati punteggi utili dal punto di vista del programma: un punteggio elevato corrisponde a una posizione vantaggiosa.

Una tecnica molto semplice, detta algoritmo minimax, seleziona solo le linee di gioco migliori cercando i punteggi massimi per le mosse del calcolatore e quelli minimi per le risposte dell'avversario. Nell'albero in alto, per esempio, i nodi B ed E sono minimizzati a 3 e −1 rispettivamente, mentre il nodo A è massimizzato a 3.

Con questa semplice procedura è possibile analizzare un ulteriore livello dell'albero solo aumentando la potenza di calcolo di un fattore 38 (pari al numero medio di mosse possibili in una tipica posizione sulla scacchiera). La potatura «alfa-beta» perfeziona l'algoritmo consentendo al programma di ignorare linee di gioco irrilevanti, cosicché è sufficiente un potenziamento di un fattore sei per analizzare un livello in più. Se per esempio il calcolo dei punteggi comincia nel nodo C e procede verso destra, il programma assegna a B il valore 3 e trova che E ha un valore inferiore o uguale a 2; pertanto conclude che è inutile considerare F.



Un altro metodo, detto dell'«estensione particolare» sfrutta meglio le capacità del calcolatore concentrandosi sulle posizioni critiche. Nell'albero in basso, il valore di B dipende fortemente da quello di C, mentre il valore di D non è legato a nessuno dei valori delle posizioni derivate. Per migliorare l'affidabilità del punteggio di A l'algoritmo analizza quindi un'ulteriore semimossa successiva a C. Questo metodo permette a Deep Thought di spingere l'analisi a profondità straordinaria in molte posizioni tatticamente complesse.

applica a casi di questo tipo; in una partita ha permesso al calcolatore di stupire un maestro annunciando un matto in 19 mosse.

Anantharaman, l'unico fra noi capace di comprendere il programma da lui scritto per il calcolatore ausiliario di ChipTest, programmò da solo l'algoritmo di estensione particolare, mentre Hsu completava il microcodice, ossia l'insieme di istruzioni che controllano l'hardware al livello più elementare. Con una capacità di analisi di 400 000--500 000 posizioni al secondo, ChipTest vinse nettamente l'edizione 1987 del Campionato nordamericano di scacchi per calcolatori, riuscendo a sconfiggere fra gli altri anche la macchina campione del mondo, Cray Blitz. In questo modo si concluse l'era della forza bruta; oggi quasi tutti i programmi migliori comprendono almeno alcuni elementi di ricerca selettiva.

Il nostro lavoro aveva indicato che vi era un notevole margine di miglioramento per quanto riguardava la velocità e la capacità di analisi di ChipTest. La somma di circa 5000 dollari necessaria per lo sviluppo del nuovo progetto - chiamato Deep Thought - ci venne generosamente messa a disposizione dal relatore di Hsu, H. T. Kung.

Il cuore della versione base di Deep Thought è costituita da 250 chip, fra cui due microelaboratori, montati tutti su un singolo pannello grande quanto metà di una pagina di questa rivista. Il congegno è gestito da un programma - il cosiddetto software ospite - che «gira» su una stazione di lavoro. Per quanto i microelaboratori non siano in sé più veloci di quelli che sono montati su ChipTest, i perfezionamenti dell'algoritmo di ricerca permettono loro di operare con un 30 per cento di efficienza in più.

Il sistema di valutazione ha quattro componenti. Un circuito di valutazione della disposizione delle figure (il solo ereditato da ChipTest) considera la posizione di queste ultime rispetto al centro della scacchiera, la loro mobilità e altri fattori. Un secondo circuito valuta lo schieramento dei pedoni in base a parametri quali il sostegno vicendevole, il controllo del centro e la protezione del re. Un terzo circuito riconosce i pedoni «passati», ossia quelli che possono essere fatti avanzare fino all'ottava traversa e promossi a regina senza incontrare l'opposizione di pedoni avversari. Infine un circuito di valutazione delle colonne assegna valori a configurazioni più complesse di pedoni e torri su una data colonna.

Da allora abbiamo anche cominciato a considerare in che modo sia possibile affinare i circa 120 parametri della funzione di valutazione specificati dal software. Tradizionalmente i programmatori stabiliscono a priori, in base a considerazioni di carattere teorico, i «pesi» da assegnare ai pezzi e alle posizioni sulla scacchiera; riteniamo che Deep Thought sia il solo programma importante capace di regolare automaticamente questi parametri.

Abbiamo selezionato 900 partite disputate da Maestri, decidendo di definire ottimali quei pesi grazie ai quali si otteneva la migliore corrispondenza fra le mosse prescelte dalla macchina e quelle effettivamente giocate dai Maestri. Il programma di valutazione è stato quindi completamente riscritto da Campbell e Nowatzyk in base a questi criteri: per autoregolarsi, la funzione di valutazione invece di assegnare semplicemente un valore numerico finale a ciascuna posizione sulla scacchiera determina un'equazione contenente un certo numero di termini di primo grado (vale a dire, un vettore).

Sono stati utilizzati due meccanismi di autoregolazione. Il primo, che chiamiamo meccanismo «di arrampicata», fissa arbitrariamente il valore di uno dei parametri di valutazione e, per le diverse posizioni della sua base di dati di 900 partite, effettua l'analisi di cinque o sei livelli dell'albero di gioco al fine di trovare le mosse che la macchina giocherebbe in quelle situazioni. Modifica poi leggermente il parametro e ripete il calcolo. Se il numero di corrispondenze fra le mosse prescelte dal calcolatore e quelle effettivamente giocate aumenta, il parametro viene ulteriormente modificato nello stesso senso e il processo continua fino a che tutti i parametri siano stati ottimizzati. Tuttavia per applicare questo metodo a tutti i parametri individuati occorrerebbero anni di lavoro e quindi lo abbiamo riservato solamente ai casi difficili.

Il secondo meccanismo di autoregolazione, proposto e messo in atto da Nowatzyk, è molto più rapido. Esso si basa semplicemente sulla ricerca della migliore corrispondenza fra il valore della funzione di valutazione calcolato dalla macchina e il valore presunto vero. A questo scopo si determina lo scarto minimo fra il quadrato della funzione calcolata e quello del valore vero, che per i nostri scopi è ottenuto con una ricerca spinta particolarmente in profondità (se si vuole affinare un punto particolare) o da un confronto fra le decisioni prese dalla macchina e quelle assunte da giocatori di alto livello.

Le 900 partite della base di dati forniscono ottime informazioni sul valore relativo di posizioni diverse: in definitiva, una posizione raggiunta in seguito a una mossa di un Grande Maestro è presumibilmente migliore di tutte le posizioni prodotte da mosse alternative.

Anziché calcolare il valore di una posizione a partire dai parametri, Nowatzyk ha calcolato i parametri stessi in base alla differenza postulata fra la posizione prescelta da un Grande Maestro e quelle da lui respinte. L'algoritmo richiede un tempo di calcolo di pochi giorni e, contrariamente a quello «di arrampicata», non ottimizza i parametri uno per volta ma li considera simultaneamente tutti.

La nostra funzione di valutazione ad autoregolazione automatica non è né migliore né peggiore delle funzioni utilizzate dai più noti fra i programmi per gli scacchi sviluppati in ambito universitario, come Hitech e Cray Blitz. Sembra esserci ancora una notevole differenza, tuttavia, fra le capacità di analisi di Deep Thought e quelle delle migliori macchine commerciali per gli scacchi, che di solito sono il frutto di anni di lavoro da parte di esperti. Perfezionando le procedure di autoregolazione, speriamo di ridurre ben presto il divario.

Può apparire strano che la nostra macchina, pur basandosi su conoscenze scacchistiche relativamente modeste, riesca a battere giocatori eccellenti. Tuttavia occorre ricordare che il calcolatore non simula i processi di pensiero umani, ma

ANATOLIJ KARPOV CONTRO DEEP THOUGHT

HARVARD UNIVERSITY, FEBBRAIO 1990

Commenti del maestro internazionale Michael Valvo

BIANCO KARPOV	NERO DEEP THOUGHT
1 e2-e4	c7-c6
2 d2-d4	d7-d5
3 Cb1-d2	g7-g6
4 c2-c3	Af8-g7
5 e4-e5	

Con questa mossa Deep Thought esce dal suo repertorio di aperture.

...	f7-f6!

Una mossa eccellente per una macchina. Il nero attacca immediatamente il più avanzato dei pedoni bianchi e indebolisce il controllo delle caselle bianche da parte del suo avversario.

6 f2-f4	Cg8-h6
7 Cg1-f3	0-0
8 Af1-e2	f6xe5!

Deep Thought effettua una contromossa attiva.

9 f4xe5	c6-c5!

In questo modo la presa d4xc5 consentirebbe al nero di ottenere un vantaggio con Ch6-g4!

10 Cd2-b3	c5xd4
11 c3xd4	Cb8-c6
12 0-0	Dd8-b6
13 Rg1-h1	a7-a5

I due pedoni centrali danno ancora al bianco un piccolo vantaggio, ma il pedone d4 è debole e le figure non cooperano adeguatamente né occupano caselle vantaggiose.

14 a2-a4	Ac8-f5
15 Ac1-g5	Af5-e4
16 Cb3-c5!	

Questa mossa, che minaccia un attacco simultaneo alla torre e alla regina nere alla prossima mossa, tiene probabilmente conto di come i calcolatori sono programmati. Deep Thought non resiste alla tentazione di catturare il pedone.

...	Db6xb2?

È uno sbaglio; sarebbe stato meglio 16 ... Ch6-f5!, in preparazione al sacrificio di una torre con 17 Cc5-d7, Db6xb2; 18 Cd7xf8, Cf5xd4!; a questo punto l'attacco del nero sarebbe stato molto pericoloso.

17 Cc5xe4	d5xe4

Deep Thought ritiene ora di essere in svantaggio dell'equivalente di un terzo di pedone. In seguito Karpov ha dichiarato di essere rimasto impressionato dalla capacità di valutazione del calcolatore, che corrispondeva alla sua.

18 Ta1-b1	Db2-a3

Mossa forzata, dato che a 18 ... Db2-c3 seguirebbe 19 Tb1-b3, mentre 18 ... Db2-a2 dovrebbe fronteggiare 19 Cf3-d2 seguita da 20 Ae2-c4.

19 Ag5-c1	Da3-c3
20 Ac1-d2	Dc3-a3
21 Ad2-c1	Da3-c3
22 Tb1-b3	Dc3-a1

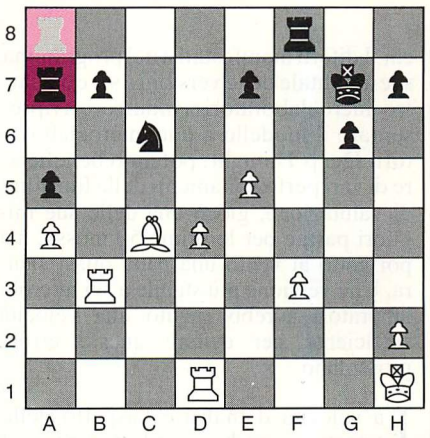
Karpov ripete le mosse per guadagnare tempo per riflettere.

23 Ae2-c4 (+)	Rg8-h8
24 Ac1xh6!	Da1xd1
25 Ah6xg7 (+)	Rh8xg7
26 Tf1xd1	e4xf3
27 g2xf3	

Sarebbe stato meglio 27 Tb3xb7; ma come poteva Karpov indovinare la mossa successiva di Deep Thought?

...	Ta8-a7!!

DEEP THOUGHT



KARPOV

Il pubblico deride questa mossa, che ritiene disastrosa, ma secondo Karpov è l'unica scelta possibile per Deep Thought.

28 Ac4-d5	Tf8-d8
29 Tb3-b5	Ta7-a6!

Il calcolatore si difende molto bene. Ora minaccia 30 ... Cc6-a7; 31 Ad5xb7, Ca7xb5; 32 Ab7xa6, Td8xd4, che porterebbe la situazione in parità.

30 Ad5-c4	Ta6-a7
31 Ac4-d5	Ta7-a6
32 Tb5-c5	Td8-d7
33 Rh1-g2	Ta6-b6!
34 Ad5xc6	b7xc6
35 Rg2-f2!	

Una mossa arrischiata, data la posizione leggermente superiore del nero, ma Karpov vuole ancora vincere.

...	Td7-d5
36 Tc5xd5	c6xd5
37 Td1-c1	Tb6-b4
38 Rf2-e3	Tb4xa4

Un altro modo, forse più semplice, per ottenere la patta sarebbe 38 ... Tb4-b3 (+); 39 Re3-e2, Tb3-b4 con ripetizione della posizione, dato che il bianco non può certo permettersi di perdere il pedone nella colonna d.

39 Tc1-c5	e7-e6
40 Tc5-c7 (+)	Rg7-g8
41 Tc7-e7	Ta4-a3 (+)
42 Re3-f4	Ta3-d3
43 Te7xe6	Td3xd4 (+)
44 Rf4-g5	Rg8-f7!

Una buona manovra difensiva.

45 Te6-a6	a5-a4

Deep Thought ritiene di essere in vantaggio e quindi non vuole forzare la patta con 45 ... h7-h6 (+); 46 Rg5xh6, Td4-h4 (+); 47 Rh6-g5, Th4-h5 (+); 48 Rg5-f4, Th5-f5 (+); seguita da 49 ... Tf5xe5.

46 f3-f4	h7-h6 (+)
47 Rg5-g4	Td4-c4?

Con 47 ... g6-g5! vi sarebbe stata patta, ma la macchina, ritenendosi ancora in vantaggio, non vuole perdere un pedone in cambio della sicurezza.

48 h2-h4	Tc4-d4
49 Ta6-f6 (+)	Rf7-g7
50 Tf6-a6	Rg7-f7
51 h4-h5	g6xh5?

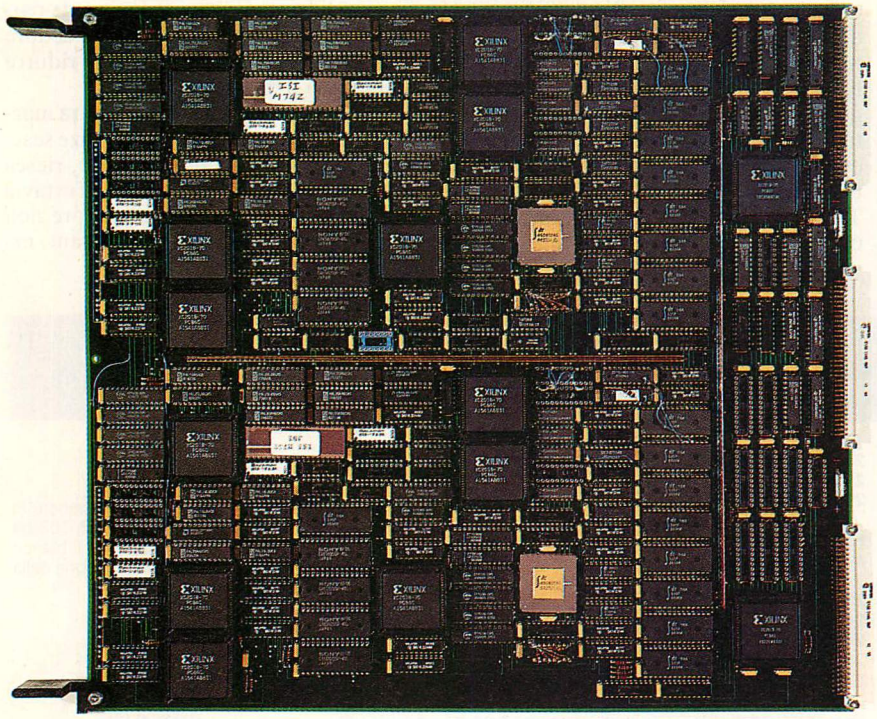
Questa mossa sancisce la sconfitta. 51 ... g6-g5, secondo Karpov, avrebbe concesso al bianco un margine di manovra troppo esiguo per vincere.

52 Rg4-f5	Rf7-g7
53 Ta6-a7 (+)	Rg7-f8
54 e5-e6	Td4-e4
55 Ta7-d7	Te4-c4
56 Td7xd5	h5-h4
57 Td5-d3	Rf8-e7
58 Td3-d7 (+)	Re7-f8
59 Td7-h7	h6-h5
60 Rf5-e5	h4-h3
61 f4-f5	Rf8-g8
62 Th7xh5	a4-a3
63 Th5xh3	a3-a2

Un giocatore preferirebbe 63 ... Tc4-a4 per prolungare la lotta, ma in questo caso 64 Re5-f6 avrebbe rapidamente la meglio.

64 Th3-a3	Tc4-c5 (+)
65 Re5-f6	Abbandona

Deep Thought si considera in svantaggio dell'equivalente di almeno sei pedoni, cosicché i suoi programmatori decidono di abbandonare. A questo punto la macchina ha ancora circa 20 minuti di tempo a disposizione, mentre a Karpov rimane meno di un minuto; tuttavia è più che sufficiente, per un giocatore del suo calibro, per conseguire la vittoria.



I principali circuiti di Deep Thought stanno in un pannello grande metà di questa pagina. Ognuno dei suoi due microelaboratori analizza fino a 500 000 posizioni al secondo. Il successore di Deep Thought, attualmente allo studio, sarà un sistema ad alto grado di parallelismo con 1000 chip progettati specificamente per il gioco degli scacchi.

raggiunge gli stessi scopi per vie diverse. Deep Thought vede in profondità ma osserva poco, ricorda ogni cosa ma non impara nulla, non fa mai errori madornali ma non migliora le proprie prestazioni. Tuttavia può a volte scoprire combinazioni che neppure un Grande Maestro riesce a vedere.

Queste particolari capacità spiegano forse perché il Grande Maestro Kevin Spraggett abbia deciso di allenarsi con Deep Thought in vista dell'incontro con il Grande Maestro Artur Yusupov per il quarto di finale del campionato dl mondo. Anche se la partecipazione della macchina non ha avuto effetti rilevanti sull'esito dell'incontro, costituisce comunque un precedente interessante.

Nell'ottobre 1989 a New York una versione sperimentale di Deep Thought con sei microelaboratori giocò un incontro di esibizione in due partite contro Kasparov. Questo nuovo modello era in grado di analizzare più di due milioni di posizioni al secondo, ma Kasparov lo sconfisse senza difficoltà. Benché il risultato non fosse inatteso, il gioco di Deep Thought risultò piuttosto deludente.

Nel febbraio 1990 Deep Thought si esibì nuovamente incontrando Anatolij Karpov, ex campione del mondo e attualmente sfidante di Kasparov nella finale del campionato del mondo di scacchi. I difetti manifestatisi nel programma sperimentale delle versioni a sei e a quattro microelaboratori ci indussero a ripresentare il modello a due microelaboratori. Deep Thought, potendo beneficiare di vari perfezionamenti della funzione di valutazione, giocò una delle sue migliori partite per le prime 50 mosse, ma poi gettò al vento una patta quasi sicura. Una versione più stabile a sei microelaboratori avrebbe avuto una velocità sufficiente per evitare questo errore grossolano.

La velocità d'analisi è l'aspetto delle nostre ricerche, condotte presso il Thomas J. Watson Research Center dell'IBM, a cui attualmente dedichiamo maggiore attenzione; il nostro obiettivo è di migliorare almeno di un fattore 1000 la versione attuale di Deep Thought. Il calcolatore al quale stiamo lavorando esaminerà quindi più di un miliardo di posizioni al secondo e potrà spingere la ricerca a una profondità di 14-15 livelli dell'albero di gioco nella maggior parte dei casi e addirittura a 30-60 livelli nelle successioni di mosse forzate. Se continuerà a valere la relazione osservata fra velocità di analisi e livello di gioco, la macchina della nuova generazione dovrebbe conseguire una valutazione di circa 3400 punti, ossia 800 punti al di sopra del suo livello attuale e ben 500 punti al di sopra del livello di Kasparov.

A questo fine Hsu sta progettando un chip specifico per il gioco degli scacchi che dovrebbe calcolare almeno tre milioni di mosse al secondo, con una velocità più di tre volte superiore a quella attuale di Deep Thought; è inoltre impegnato nell'ideazione di un sistema ad alto grado di parallelismo che sarà composto da 1000 di questi chip, con un ulteriore guadagno di circa 300 volte. Anantharaman e Campbell stanno perfezionando diversi aspetti della versione attuale di Deep Thought, in vista di una loro introduzione nel futuro calcolatore, e Nowatzyk persegue altri interessi di ricerca.

Noi riteniamo che questo nuovo sistema sarà sufficientemente forte, grazie alla sua sola velocità, da costituire un valido avversario per il campione del mondo; e siamo convinti che l'adozione di una lunga lista di miglioramenti già previsti consentirà alla macchina di avere la meglio, forse già nel 1992.

Kasparov è di avviso contrario e noi rispettiamo la sua opinione. In privato egli ha ammesso che una macchina in grado di analizzare un miliardo di posizioni al secondo potrebbe sconfiggere un Grande Maestro di medio livello, «ma non Karpov e me!». Il campione del mondo afferma che un giocatore di altissimo livello dovrebbe riuscire a prepararsi adeguatamente per trarre vantaggio dalle particolari carenze che sono caratteristiche dei calcolatori; a parere di Kasparov la creatività e l'immaginazione umana, e in particolare la *sua* creatività e immaginazione, non potranno che avere la meglio su un semplice congegno a base di silicio.

Di fatto, quando le due parti si troveranno di fronte sulla scacchiera, l'ingegno di un giocatore di grandissimo talento sarà opposto non a una macchina, ma al lavoro di generazioni di matematici, informatici e tecnici. Riteniamo che l'esito dello scontro ci rivelerà non se le macchine siano in grado di pensare, ma piuttosto se uno sforzo umano collettivo possa avere la meglio anche sugli individui più dotati.

(Da «Le Scienze» n. 268, dicembre 1990.)

FENG-HSIUNG HSU, ANDREAS NOWATZYK, MURRAY CAMPBELL e THOMAS ANANTHARAMAN *costituiscono il gruppo di ricerca che ha costruito il calcolatore* Deep Thought *descritto nell'articolo. Hsu, Anantharaman e Campbell lavorano tutti presso il Thomas J. Watson Research Center della IBM, mentre Nowatzyk lavora per la Sun Microsystems.*

Il progetto MAIA

di Luigi Stringa

Il «modello avanzato di intelligenza artificiale» studia l'intelligenza come sistema integrato di comportamenti, buon senso e capacità di apprendere direttamente dall'esperienza

Non essendo né sostanza né accidente, la peste non può esistere: e così don Ferrante morì di peste. Ma c'è anche chi ha realizzato e collaudato con successo delle bellissime macchine termiche quando la teoria termodinamica non era ancora stata inventata. Forse non brillavano per rendimento, ma funzionavano benissimo. L'intelligenza artificiale (IA) non è proprio la peste (anche se alcune sue caratteristiche sembra possederle), ma non gode certo del supporto di un'elegante e convincente teoria unitaria. Sempre che ve ne possa mai essere una, e che la ricerca di questa non sia, per dirla con Douglas B. Lenat, frutto di invidia per la fisica. Forse non sarà contagiosa come la peste, ma c'è chi la condanna al pari o peggio di essa e, ciò che alla peste non è proprio successo, prima ancora di lasciarle il tempo di venire compiutamente alla luce. Già, non esiste ancora, eppure una grande folla di «pensatori» è pronta a garantirvi quali mete non potrà mai raggiungere. C'è persino chi ha definito «intelligenza» proprio quello che le macchine non potranno mai fare, come afferma il cosiddetto «teorema di Tesler». E anche nel mondo degli addetti ai lavori le risse, talora furibonde e pestifere, non mancano affatto.

Però che l'intelligenza artificiale sia una disciplina così chiacchierata e contestata non deve meravigliare più di tanto: quella naturale non è certo da meno. Da sempre la sua definizione è un vero e proprio pomo della discordia. E persino l'uomo della strada, ben lungi anche soltanto dal porsi il problema di definirla, sa invece benissimo dirvi se non c'è (contate al proposito il numero di volte che avete sentito dare dello scemo e confrontatelo con il numero di volte che avete sentito dare dell'intelligente...). La mia posizione è elettivamente più vicina ai progettisti di macchine termiche: naturalmente, se la teoria ci fosse, cercherei di farne tesoro; ma, in assenza di questa, mi par meglio realizzare qualche «macchina utile». E la definizione di intelligenza artificiale? Potrei sempre cavarmela con un secco «Lei mi dica cos'è l'intelligenza, che a spiegarLe l'attributo *artificiale* sono bravissimo anch'io!». Per me quello che chiamiamo intelligenza è un insieme di comportamenti; l'intelligenza artificiale è la disciplina impegnata nello sviluppo di macchine in grado di esibire quell'insieme di comportamenti (o almeno una loro parte cospicua).

La verità è che con l'IA affrontiamo un tema di ricerca tra i più affascinanti e, per certi aspetti, del tutto unico. È la prima volta nella storia della scienza che soggetto, strumento e oggetto della ricerca coincidono: il pensiero (l'intelligenza) analizza se stesso per produrre pensiero (intelligenza). Strumento: ancora l'intelligenza, del ricercatore. La natura del pensiero, insieme con l'origine della vita e l'origine e la struttura dell'universo, sono le tre grandi sfide della scienza moderna.

La nascita dell'IA

Veniamo alla storia. Possiamo prendere come data di nascita il 1950, anno in cui apparve il saggio *Computing Machinery and Intelligence* di Alan M. Turing (tradotto in italiano *Macchine calcolatrici e intelligenza*). Oppure il 1956, anno in cui Marvin Minsky e John McCarthy coniarono la denominazione «ufficiale» *Artificial Intelligence* in occasione di uno storico convegno al Darthmouth College. In ogni caso l'IA ha da un pezzo superaro la trentina. E tuttavia la domanda iniziale «Possono pensare le macchine?» attende ancora una risposta soddisfacente. Si può anzi dire che oggi, dopo oltre trent'anni di intensa attività, manca ancora chiarezza sul significato di termini così fondamentali quali «intelligenza» e «pensiero» (si pensi al dibattito sulla «stanza cinese» di John R. Searle). Questo non significa che l'IA non abbia fatto progressi significativi. Però questa mancanza di chiarezza, questa mancanza di un paradigma comune al quale fare riferimento, evidenzia la crescente necessità di una riflessione seria sugli obiettivi e sul metodo di questa disciplina (anche per distinguerla dalle altre discipline con cui viene spesso confusa, dall'informatica tradizionale alla filosofia della mente).

Agli inizi «intelligenza» era soprattutto ragionare, dimostrare teoremi, giocare a scacchi. I ricercatori dell'IA erano convinti che la costruzione di macchine logiche portentose (nello spirito dell'*Ars magna* di Raimondo Lullo e del *Calculus ratiocinator* di Gottfried Wilhelm Leibniz) li avrebbe condotti direttamente al nucleo dell'intelligenza. Oggi ci rendiamo conto che le cose stanno diversamente. Ciò che avrebbe dovuto costituire il livello più alto (il rigore della logica, le «leggi del pensiero» di George Boole) è stato raggiunto con una certa rapidità, perlomeno entro certi limiti. Paradossalmente, però, i sistemi sviluppati non sembrano in grado di fornire soluzioni soddisfacenti proprio per quei problemi che il senso comune reputerebbe più semplici. Così, per esempio, oggi abbiamo programmi capaci di giocare a scacchi ad altissimo livello. Eppure un sistema che abbia almeno le capacità visive di un insetto è ancora un obiettivo lontano. Non solo. Ci siamo anche resi conto di quanto sia difficile produrre il software adatto a svolgere questi compiti, di quanto software occorrerebbe per «replicare» anche i comportamenti apparentemente più elementari, come riconoscere oggetti semplici in base all'informazione visiva.

Genesi di MAIA

È in questo scenario che si colloca la nascita dell'IRST e del progetto MAIA. A 35 anni dalla comparsa di *Computing Machinery and Intelligence* mi ero convinto che si dovesse por mano a una ridefinizione del problema, prendendo an-

L'Istituto per la ricerca scientifica e tecnologica (IRST) sorge vicino a Trento. Con un personale di 180 unità tra cui oltre 100 ricercatori, è uno dei leader mondiali della ricerca sull'intelligenza artificiale. All'IRST è adottato un approccio integrato nel quale convergono i principali campi di ricerca: visione, riconoscimento e sintesi del parlato, elaborazione del linguaggio naturale, ragionamento meccanizzato e pianificazione, fattori umani, rappresentazione delle conoscenze. Il progetto MAIA (acronimo di «Modello avanzato di intelligenza artificiale») è l'espressione concreta di questa metodologia.

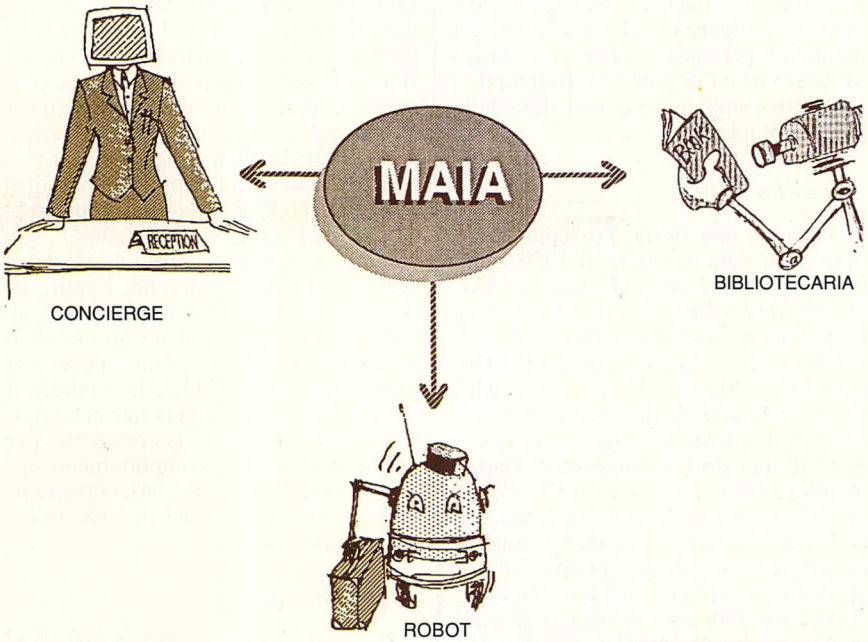
zitutto le mosse da questa «lezione storica». Nel giugno 1984 (ero allora amministratore delegato della Selenia), il senatore Bruno Kessler mi chiese un parere su un suo ambizioso progetto: realizzare a Trento un centro di ricerca d'avanguardia, ma con i piedi saldamente piantati per terra, capace cioè di generare efficacemente conoscenza strategica, ma applicabile. Considerai subito l'occasione unica e irripetibile: poter realizzare in Italia un approccio nuovo, pragmatico, all'intelligenza artificiale. Meno di un anno dopo ero già a Trento, a stilare il piano quinquennale per lo sviluppo di un sistema integrato di IA. L'obiettivo: un sistema magari modesto, ma funzionante, come le macchine termiche, utile; forse non brillante, ma di buon senso.

Stando alla definizione pragmatico-operativa del test di Turing, per essere «intelligente» un sistema doveva comportarsi come una persona, per esempio in un dialogo cieco attraverso una parete. Ma nell'interpretazione usuale, questa definizione non evidenziava uno degli aspetti più rilevanti del comportamento intelligente: l'apprendimento. L'incapacità dei sistemi sviluppati di evolversi da soli, di imparare, senza bisogno di essere completamente programmati, era secondo me una barriera che l'IA doveva superare per poter raggiungere gli scopi prefissi, sia sul piano scientifico sia sul piano applicativo. Ero sicuro che un sistema artificiale - per esempio un robot, o il calcolatore che lo controlla - ci sarebbe sembrato tanto più intelligente quanto più sarebbe stato capace di imparare da solo esplorando il mondo circostante, anche se le sue prestazioni globali potevano inizialmente sembrare piuttosto modeste.

Non bastava quindi costruire un sistema esperto abilissimo nel gioco degli scacchi, o un sistema capace di effettuare diagnosi mediche accuratissime: per meritarsi l'attributo «intelligente», il sistema doveva essere in grado di migliorarsi da solo. Doveva poter interagire direttamente con l'ambiente fisico e imparare dall'esperienza. Il sistema avrebbe esibito un comportamento «intelligente» se avesse dimostrato di essere in qualche modo «curioso» di esplorare il mondo per scoprire e apprendere fatti nuovi.

Uno dei contributi più costruttivi dei primi 30 anni era stata la nozione di IA come «disciplina sperimentale». Questa caratteristica acquistava un significato ancora maggiore alla luce delle considerazioni fatte sopra. Un adeguato approccio al problema dell'apprendimento richiedeva lo sviluppo di un'idonea piattaforma sperimentale, di un sistema con capacità sensoriali e motorie atte a interagire direttamente con le persone e col mondo fisico. Ed era chiaro che una piattaforma di questo tipo doveva essere in grado di gestire contemporaneamente diverse fonti di informazione e diverse sorgenti di conoscenza. Doveva essere - in breve - una piattaforma «integrata».

I primi anni di vita dell'IA erano stati invece caratterizzati da un'eccessiva frammentarietà della ricerca. Tanto nei centri accademici quanto in quelli industriali, lo sviluppo parallelo e solo parzialmente interagente nei vari campi di ricerca aveva spesso condotto a risultati che, se non contrastanti, non si connettevano l'uno all'altro in maniera omogenea; non consentivano quindi prestazioni *globali* soddisfacenti. Trecento anni prima di Turing, Cartesio aveva dichiarato che i limiti delle macchine nei confronti dell'uomo risiedono essenzialmente nella natura specialistica delle



La piattaforma sperimentale di MAIA è un sistema integrato costituito da tre componenti principali: un concierge automatico, che interagisce con i visitatori in linguaggio naturale rispondendo alle loro domande sul ruolo, gli obiettivi, la struttura dell'IRST; una bibliotecaria elettronica, che gestisce i prestiti e le restituzioni riconoscendo le persone e i libri; una famiglia di robot mobili dai compiti diversi, capaci di «navigare», cioè spostarsi autonomamente, nei corridoi dell'IRST.

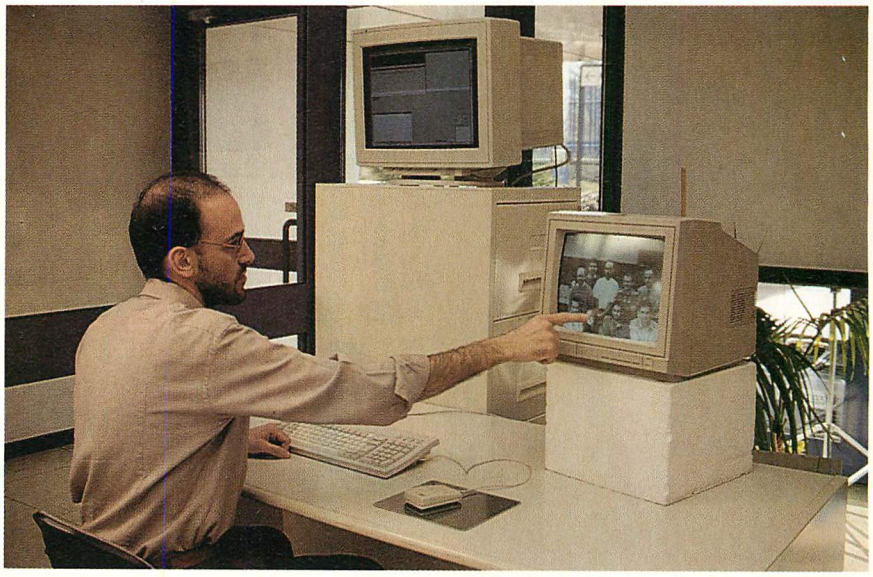
prime: «Quand'anche quelle fossero in grado di fare certe cose al pari dell'uomo - se non meglio - esse commetterebbero comunque errori in altre cose, rivelando in tal modo come il loro agire sia dettato non dalla sapienza, bensì dal puro e semplice posizionamento delle parti che le costituiscono.» Naturalmente questa posizione risentiva pesantemente di una concezione di «macchina» ormai obsoleta. I sistemi esperti sviluppati dall'IA erano ben diversi dai rozzi automi del XVIII secolo. Ciononostante bisognava ammettere che nessuna esibiva un comportamento «intelligente». Al massimo potevamo dire di aver sviluppato una gran varietà di sofisticati sistemi in grado di espletare alla perfezione (o quasi) i compiti loro assegnati, ma solo quelli. (Anche perché gran parte delle grandi industrie produttrici di calcolatori, lungi dal combattere la tesi cartesiana, aveva paradossalmente propagandato una concezione molto affine mediante lo slogan «le macchine fanno solo ciò che viene loro richiesto»: come se la presunzione umana di possedere il monopolio dell'intelligenza si basasse su un bisogno di autoprotezione psicologica.)

In breve, è vero che Turing aveva determinato un salto di qualità nell'approccio scientifico al problema dell'intelligenza nelle macchine, ma è altrettanto vero che poi si era perso di vista quanto Turing avesse insistito sull'aspetto globale dell'intelligenza. L'*expertise* locale non poteva essere considerato un ingrediente sufficiente (e forse nemmeno necessario) del comportamento intelligente. E l'IA non poteva limitarsi allo sviluppo di sistemi artificiali capaci di eseguire determinati compiti in modo stupidamente perfetto. Per ottenere risultati significativi, era necessario un approccio globale all'IA che fosse qualcosa di più della semplice aggregazione di gruppi di ricerca impegnati in campi diversi: occorreva un progetto che, al di là delle esigenze specifiche, garantisse l'integrazione delle varie aree di ricerca unificandole con un solo obiettivo.

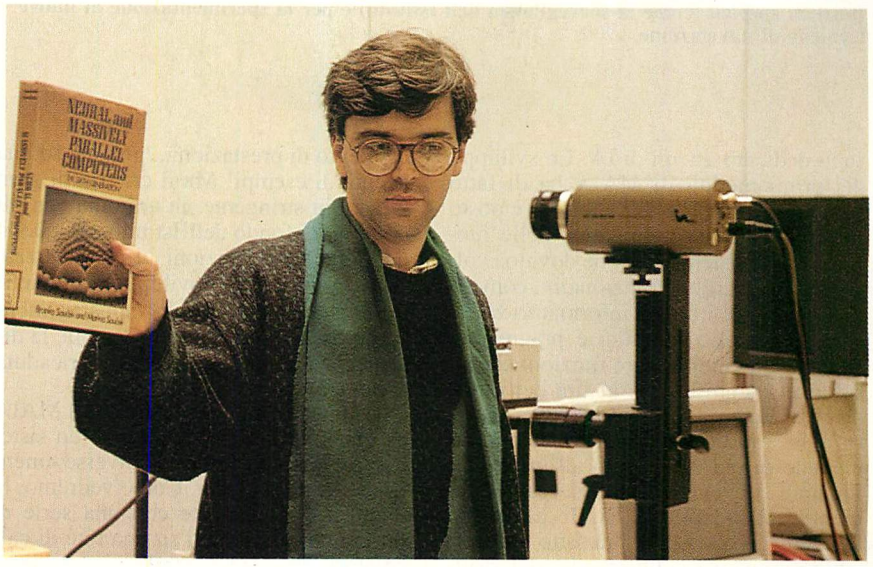
Nacque così il progetto MAIA (acronimo di «Modello avanzato di intelligenza artificiale»). Oggi vi lavorano più di 100 ricercatori, con competenze diverse (visione, riconoscimento e sintesi del parlato, linguaggio naturale, fattori umani, rappresentazione delle conoscenze, ragionamento meccanizzato), ma con un unico obiettivo: realizzare fisicamente un sistema su cui verificare *sperimentalmente* la correttezza dell'approccio integrato già discusso, per disporre poi di una piattaforma che consenta, partendo dal basso, dalla percezione dell'ambiente, di affrontare il problema dell'apprendimento, acquisendo autonomamente esperienza dall'interazione diretta con le persone e col mondo fisico. Ma questo sarà il principale obiettivo del prossimo piano quinquennale: per ora ci basta poter scalfire il problema dell'apprendimento a livelli più modesti, come vedremo meglio nel seguito.

Nel 1986, la posizione era tutt'altro che condivisa. C'era persino chi faceva coincidere l'IA con... l'uso di qualche linguaggio di programmazione, per altro ormai in totale declino (LISP, per esempio). Quando leggo che finalmente, nel 1990, Allen Newell della Carnegie Mellon University lanciava un appello affinché i ricercatori cooperassero per costruire «sistemi intelligenti integrati», riguardo il mio piano quinquennale 1986-1990 con una certa soddisfazione. Era proprio questo infatti il principio informatore del piano: «L'approccio fondamentale può essere sintetizzato con l'aggettivo "sistemistico"». L'approccio consisteva nel condurre la propria attività in modo da rendere il più omogenea possibile la comunità dei ricercatori, che «dovrà muoversi senza limitare le proprie capacità creative, ma cercando con continuità una confluenza di fondo sui contenuti e sui metodi». Ciò anche nella convinzione che «questo approccio, basato su un'accorta integrazione di componenti concettuali, possa portare a risultati di sintesi abbastanza soddisfacenti, anche al di là di quanto le singole componenti facciano sperare».

I primi due anni del piano quinquennale (1986-1987) sono stati dedicati alla creazione delle risorse: nel 1985 l'Istituto aveva una ventina di ricercatori, nes-



Collocato all'ingresso dell'Istituto, il concierge di MAIA è un terminale che dialoga con i visitatori in un italiano abbastanza flessibile, dando informazioni sull'IRST. L'interazione è multimediale (tastiera, *mouse*, immagini, grafica): qui l'utente indica la persona su cui chiede informazioni. È prevista l'aggiunta di un sistema di riconoscimento e sintesi del parlato, che consentirà un vero e proprio colloquio.



L'utente mostra il libro alla bibliotecaria elettronica di MAIA. Dato che questa è in grado di riconoscere le immagini della copertina del libro e della faccia dell'utente, il sistema procede alla registrazione automatica della transazione (prestito o restituzione).

I robot mobili di MAIA sono attualmente due: uno principale (*a sinistra*), dotato di telecamera e sensori a ultrasuoni e in grado di comunicare a voce con le persone (mediante microfono e altoparlante), e un secondo robot più piccolo (*a destra*), usato per funzioni speciali (come la sorveglianza dell'Istituto) e per la sperimentazione di nuove tecniche di navigazione.

suno dedicato a temi di IA. Lo sviluppo dei primi moduli di MAIA ha di fatto avuto inizio nel 1988. E subito si è posto il problema della definizione delle funzioni che il sistema avrebbe dovuto svolgere: le «specifiche funzionali», come si dice in gergo. I criteri informatori erano anch'essi molto semplici e pragmatici. Si dovevano individuare funzioni che risultassero significative ai fini dei nostri obiettivi scientifici, cioè adatte a verificare la validità dell'ipotesi comportamentale di cui ho parlato all'inizio. Le funzioni dovevano essere esaurientemente collaudabili in IRST, altrimenti avremmo una volta di più fatto un esercizio puramente congetturale, dai risultati poco attendibili, come purtroppo spesso accade: la letteratura scientifica è piena di elegantissimi algoritmi, col 100 per cento di prestazioni... provate su una decina di esempi! Ma il criterio di gran lunga più stringente, in armonia con gli obiettivi di fondo dell'Istituto, era quello di individuare funzioni la cui realizzazione consentisse lo sviluppo di tecniche e sottosistemi applicabili industrialmente, per ridurre quanto più possibile la distanza esistente tra ricerca e ricaduta applicativa.

La piattaforma sperimentale di MAIA è concepita e sviluppata come un sistema integrato costituito da diverse «menti» e alcuni «bracci». Come vedremo, le menti sono realizzate con una serie di programmi distribuiti su una rete di calcolatori che, interagendo cooperativamente tra loro, governano lo svolgimento delle funzioni dei tre principali bracci di MAIA: il *concierge* dell'Istituto, la *bibliotecaria elettronica*, nonché una famiglia di *robot* mobili dai compiti diversi, in grado di spostarsi in modo autonomo all'interno dell'edificio che ospita l'IRST.

La metafora del concierge

Quella del *concierge* è una comoda metafora per descrivere sinteticamente una buona parte delle più significative funzioni che il sistema MAIA deve svolgere. Un buon concierge sa rispondere a qualsiasi domanda sull'organizzazione cui appartiene, sul ruolo e sui compiti delle persone che la compongono; sa fornire indicazioni sui più disparati argomenti, dal nome del direttore all'ubicazione dell'ufficio acquisti; dal periodo di chiusura estiva, al mezzo pubblico più conveniente per raggiungere la stazione ferroviaria. Se è bravo, vi riconosce se vi ha già visto anche una sola volta. Magari sa anche con chi di solito volete parlare. E vi dice subito se c'è, o quando e dove lo potete trovare. Insomma, un banco di prova ideale per le nostre idee sull'intelligenza artificiale. Interagire gradevolmente con persone note e sconosciute, utilizzando in maniera integrata diverse sorgenti di conoscenza, sono le caratteristiche peculiari del concierge. E questa è la scelta che abbiamo fatto, coerente con i criteri informatori che ci siamo imposti: quello scientifico della significatività dal punto di vista comportamentale e quello della sperimentabilità effettiva in Istituto. Ma anche e soprattutto dal punto di vista delle possibili ricadute applicative: lungo tutta la durata del progetto sarà possibile derivare dal concierge di MAIA una serie di sistemi sempre più evoluti - capaci di dialogare in linguaggio naturale anche con utenti non specialisti - per interrogare banche dati e basi di conoscenza private e pubbliche. Con un mercato potenziale enorme, sia nel settore dei servizi sia in quello produttivo. A solo titolo di esempio, si pensi a quanti servizi di informazione devono fornire le pubbliche amministrazioni!

Fisicamente il «braccio» concierge di MAIA è un terminale ubicato all'ingresso dell'Istituto. Oltre a monitor, tastiera e *mouse*, impiegherà una telecamera, un microfono e un altoparlante per vedere, ed eventualmente riconoscere, l'interlocutore, dialogare con lui a voce o a mezzo tastiera. Il monitor, poi, consente sia di presentare immagini in risposta alle richieste dell'utente sia a quest'ultimo di puntare col dito la parte di immagini di interesse, grazie al dispositivo di *touch screen* di cui il monitor è dotato. Ciò permette un'interazione che si basa su una vasta gamma di modalità, lasciando all'utente un'ampia possibilità di scelta.

Il concierge inoltre interagisce direttamente con altri bracci di MAIA. Per esempio, può affidare il visitatore che deve venire da me a uno dei robot mobili, che lo guida sino alla porta del mio ufficio. Oppure può inviare il robot in varie parti dell'edificio per assolvere a

compiti specifici come consegnare la posta, ritirare un libro in biblioteca eccetera. Insomma, anche il nostro concierge elettronico ha la sua squadra di facchini e inservienti, che eseguono zelantemente i compiti loro affidati.

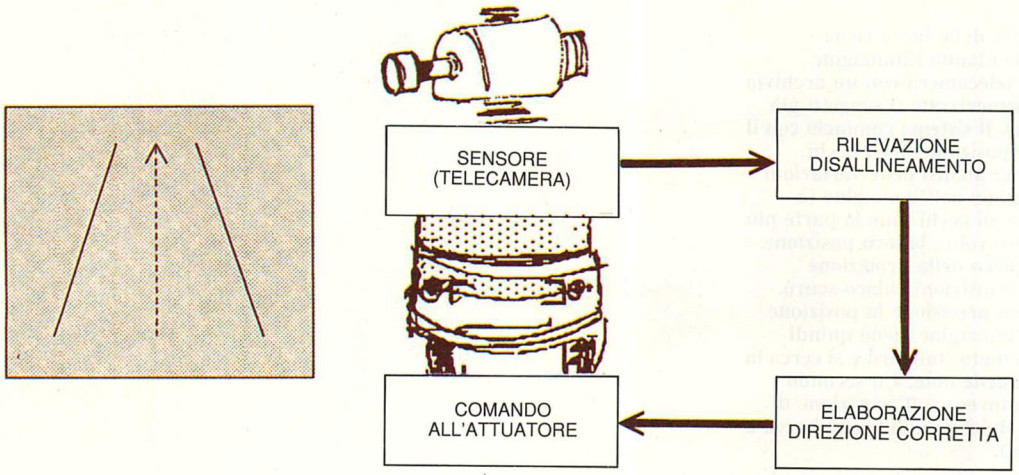
La bibliotecaria elettronica

Ubicata nella biblioteca dell'Istituto, il braccio «bibliotecaria elettronica» è un terminale la cui composizione non si discosta molto da quella del concierge: monitor, tastiera e *mouse*, e, naturalmente, telecamera, microfono e altoparlante. Ci si presenta di fronte alla telecamera, mostrando la faccia proprio come si fa davanti a un video-citofono. MAIA (o più precisamente la sua bibliotecaria elettronica) se ne accorge. Vi chiede cosa volete e, se vi identifica, riconoscendo la vostra faccia e la vostra voce, vi autorizza a utilizzare la biblioteca. Basta presentare il libro che volete restituire (o che volete prendere in prestito) in modo che la telecamera ne veda la copertina. Il sistema se ne accorge, lo riconosce ed effettua automaticamente la registrazione del prestito (o della restituzione) a vostro nome. Non è necessario un posizionamento preciso: il libro va posto approssimativamente a un metro dall'obiettivo, in modo naturale, senza troppi vincoli né sulla distanza, né sull'orientamento. Qualora il libro non fosse noto, la bibliotecaria elettronica ne dovrà leggere il titolo, l'autore e gli altri dati identificativi.

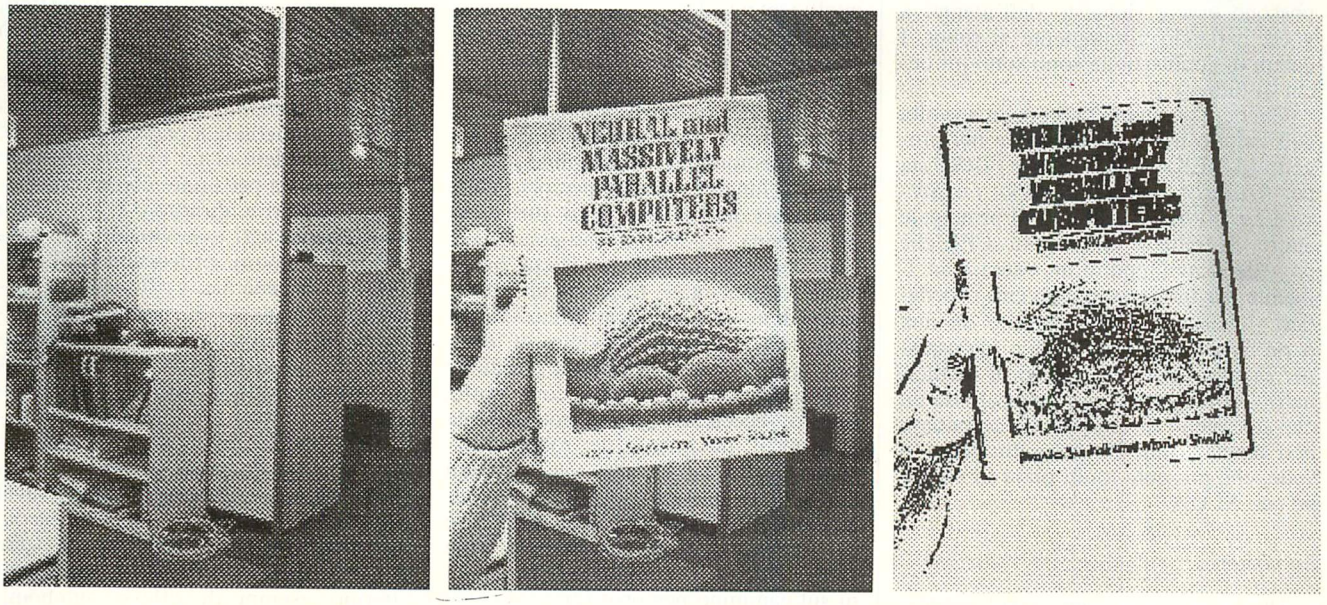
Fornire suggerimenti bibliografici basati su ragionamento ed esperienza fa parte dei compiti del sistema: ancora una volta, un braccio che consente un'ampia verifica dell'approccio IRST all'intelligenza artificiale, che è operativamente collaudabile in Istituto e che è suscettibile di una vasta gamma di applicazioni. Basti pensare al mercato dei sistemi per l'identificazione delle persone!

I robot mobili

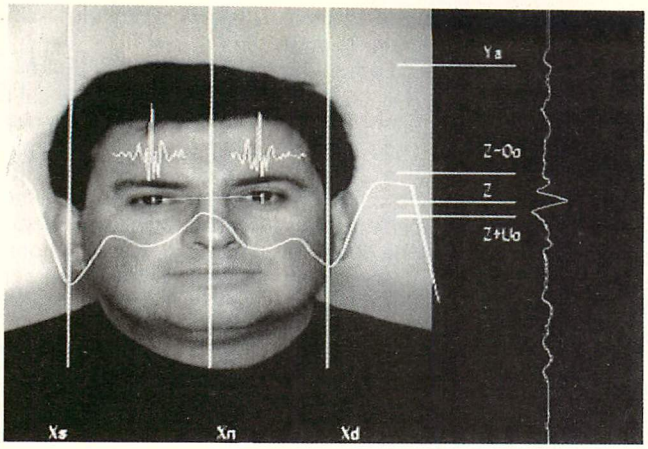
Il terzo braccio di MAIA è costituito da un robot principale e da alcuni «robottini» per compiti speciali (sorve-

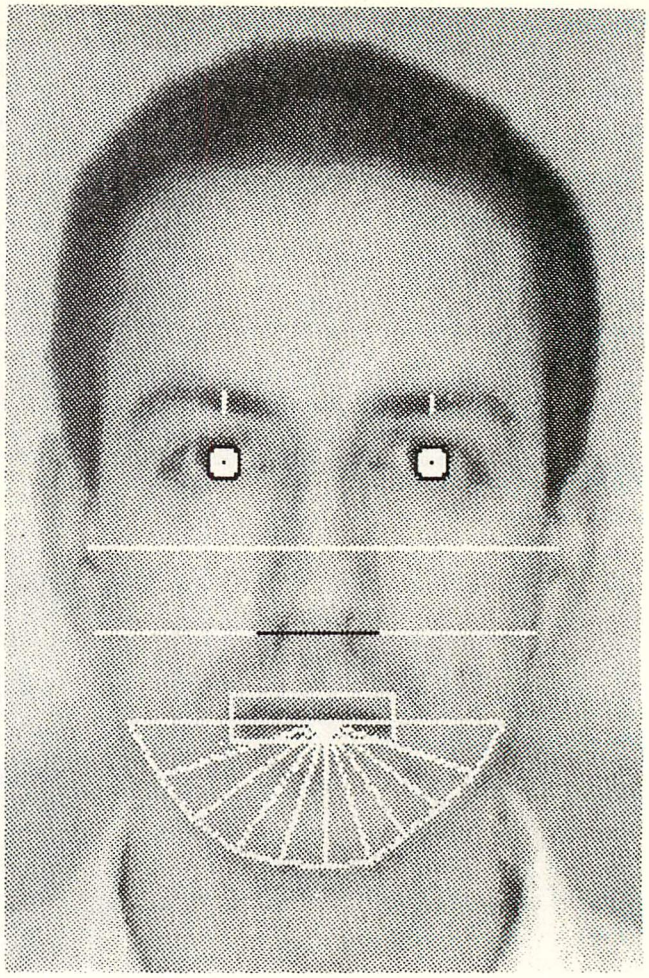


Il sistema di navigazione del robot principale di MAIA utilizza un insieme di riflessi autonomi, ciascuno dei quali viene sintetizzato come un sistema di controllo sensori-attuatori-sensori. Per esempio, il riflesso autonomo «segui la mezzeria», qui schematicamente raffigurato, mette il robot in condizioni di spostarsi mantenendosi sempre al centro del corridoio.



La telecamera della bibliotecaria elettronica di MAIA continua a «guardare» la scena circostante: non appena qualcuno o qualcosa entra nel suo campo visivo, se ne accorge e ne separa l'immagine da quella dello sfondo con un procedimento molto semplice. Se le immagini che si susseguono sono sostanzialmente identiche, la scena è statica, non vi è nulla di nuovo da vedere; se invece vi sono differenze significative, la parte variata è l'immagine dell'oggetto entrato nel campo. Qui sono illustrati i passi salienti del processo di estrazione dell'immagine di un libro: immagine dello sfondo (*a sinistra*), immagine del libro entrato nel campo visivo (*al centro*), immagine binarizzata della «differenza» tra le due (*a destra*). Lo stesso procedimento viene impiegato per avvertire la presenza di una persona ed «estrarne» la faccia ai fini del riconoscimento.





Il riconoscimento delle facce viene effettuato confrontando l'immagine acquisita dalla telecamera con un archivio di immagini memorizzate (i soggetti già «noti» a MAIA). Il sistema comincia con il determinare la posizione degli occhi basandosi su una analisi delle variazioni di tonalità di grigio nell'immagine (*a sinistra*). Poiché gli occhi sono la parte più strutturata di un volto, la loro posizione determina un picco nella proiezione verticale delle transizioni chiaro-scuro. Determinata con precisione la posizione delle pupille, l'immagine viene quindi ridotta a un formato standard e si cerca la più simile tra quelle note. Un secondo metodo si basa invece sull'estrazione di caratteristiche tipiche quali occhi, bocca e mento (*a destra*).

glianza, esplorazione, sperimentazione di nuove tecniche di navigazione). Ho già descritto le loro principali funzioni. Le loro missioni, oltre che dal concierge, possono essere richieste dall'utente, a voce, parlando direttamente al robot. I campi di applicazione sono sotto gli occhi di tutti.

Già oggi una parte della ricerca svolta dall'Istituto trova applicazione nel progetto EUREKA-FIRST (dove FIRST sta per *Friendly Interactive Robot for Service Tasks*) di cui l'IRST è il principale attore. Si tratta di un progetto CEE che prevede lo sviluppo di un sistema intelligente per impiego in ambienti ospedalieri. Il sistema sarà costituito da una parte fissa e una parte mobile (da usarsi per esempio per il trasporto di medicinali) e dovrà essere caratterizzato da un elevato livello di interattività con utenti non specializzati. Un progetto, come si vede, che presenta molti punti in comune con MAIA.

La visione

Tutti e tre i componenti del sistema MAIA utilizzano la visione per svolgere le loro funzioni: i robot mobili per navigare (aggirarsi) autonomamente per l'Istituto; il concierge e la bibliotecaria elettronica per riconoscere le persone «guardandole» attraverso una telecamera, e per riconoscere le copertine dei libri e leggerne i titoli. Questa scelta sottolinea l'importanza che attribuiamo alla visione nel determinare il comportamento intelligente: vedere consente di acquisire una enorme quantità di informazioni sul mondo esterno, fornendo gli elementi necessari a interagire correttamente con esso, sia in termini di ambiente, sia di persone, o, più in generale, di altri agenti. Per esempio, un robot mobile può incontrare lungo il proprio percorso tanto ricercatori dell'IRST quanto altri robot del sistema MAIA. In particolare, nel caso dei robot mobili, la visione ha un ruolo fondamentale, fornendo al sottosistema di navigazione le informazioni necessarie a orientarsi, a evitare gli ostacoli, a individuare la propria posizione riconoscendo punti notevoli come porte, finestre eccetera. Questo sottosistema governa il movimento dei robot utilizzando anche dati di altri sensori, quali una serie di misuratori di distanza a ultrasuoni e gli odometri che, sulla base del numero di rotazioni eseguite dalle ruote, rendono disponibili le informazioni sul cammino percorso (proprio come il contachilometri parziale della vostra automobile vi informa sulla distanza coperta dall'inizio del viaggio). Tali informazioni, integrate con una schematica mappa dell'Istituto, consentono al robot di sapere dove si trova, e di pianificare il percorso per raggiungere la destinazione assegnata come obiettivo.

Dal punto di vista dell'architettura, il sottosistema di navigazione si fonda su due schemi comportamentali distinti: uno basato su «riflessi», che chiamerò componente *spinale*, e uno, più convenzionale, basato sulla pianificazione, che chiamerò *corticale*. I riflessi provocano reazioni immediate a particolari stimoli, senza richiedere alcun «ragionamento»: se il robot sta per urtare contro un ostacolo, i sensori a ultrasuoni lo segnalano direttamente agli asservimenti che controllano i motori, provocandone l'arresto. Più in generale, i riflessi sono realizzati come anelli di retroazione (*feed-back loop*), semplici sensori-attuatori-sensori; per esempio, il sistema di visione è in grado di estrarre dall'immagine gli spigoli, evidenziando i confini fra pavimento e muro. Il riflesso, che abbiamo chiamato «segui la mezzeria», consente al robot di rimanere al centro del corridoio. Evitare ostacoli, imboccare un altro corridoio, avanzare di una distanza prefissata sono tutti ulteriori esempi di riflessi autonomi.

La componente corticale si occupa invece della pianificazione delle azioni. Essa controlla i riflessi e ha accesso a una mappa dell'Istituto. Ciò le consente di tradurre richieste anche in linguaggio naturale (come «vai nell'ufficio di Strin-

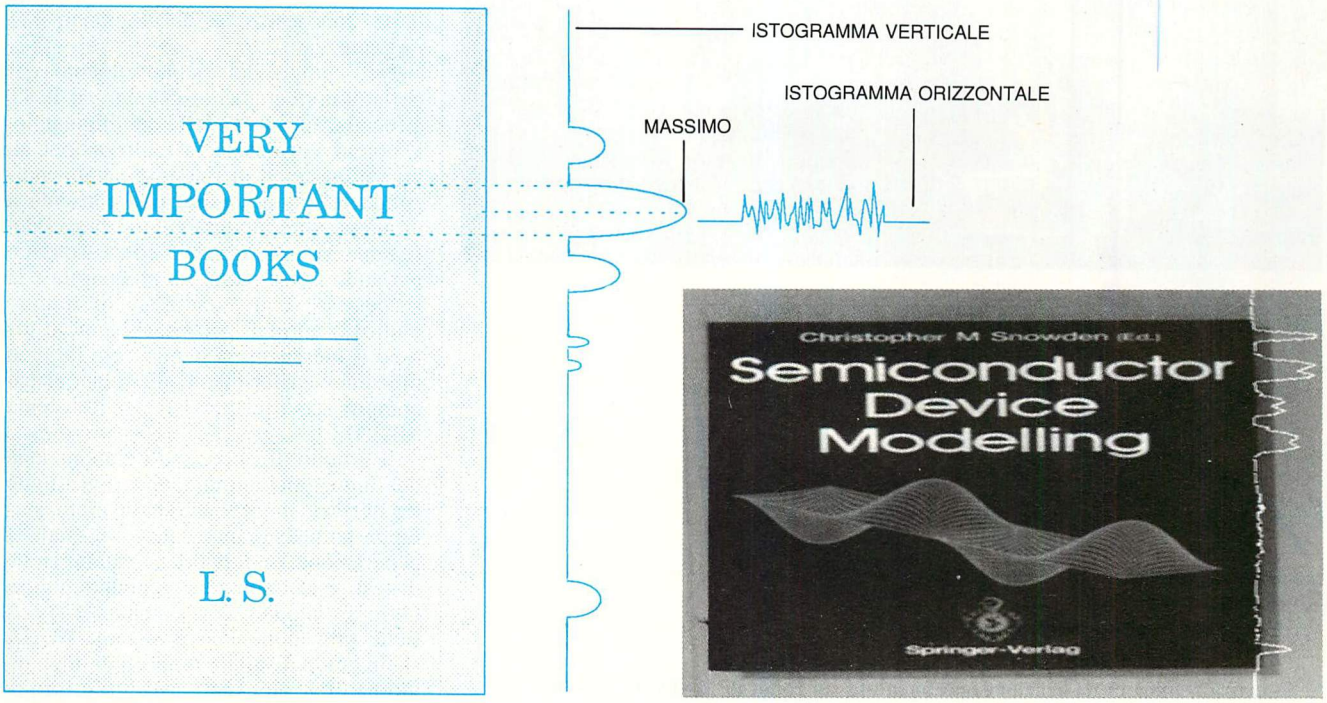
ga») in comandi comprensibili al sottosistema di navigazione. Le coordinate del mio ufficio sono rilevabili dalla mappa. Occorre pianificare una traiettoria per raggiungerlo. Basta poi tradurla in una sequenza di comandi del tipo: «Segui la mezzeria del corridoio per 10 metri; gira a destra; avanti per altri 5 metri; gira a sinistra.» I riflessi provvederanno a governare l'esecuzione, evitando gli ostacoli, anche non previsti nella mappa. La componente corticale userà anche informazioni più complesse, elaborate dal sistema di visione, per identificare la posizione dal riconoscimento dei punti notevoli (*landmark*), prevedere ostacoli lontani, verificare il proprio orientamento eccetera. Si potrebbe dire: la componente spinale ha una funzione più tattica e immediata; quella corticale, strategica e di più alto livello. La distinzione è soprattutto dettata da ragioni pratiche: i riflessi sono implementati in periferia, con routine molto semplici, su un hardware dedicato al controllo della piattaforma mobile. Ciò semplifica notevolmente i problemi di gestione, scaricando il sistema di elaborazione centrale e aumentando l'affidabilità.

È questo un caso in cui l'analogia coi sistemi biologici sembra vincente! Anche per il riconoscimento delle persone e degli oggetti, come i libri, vi è, almeno concettualmente, un'architettura analoga. Le telecamere del concierge e della bibliotecaria elettronica continuano a «guardare» confrontando immagini successive: se queste sono identiche, vuol dire che la scena è statica, che non sta succedendo niente, che non vi è nessun oggetto o persona nuova da riconoscere. Un'operazione periferica semplice, quale sottrarre da ciascuna immagine la precedente, risolve il problema: se il risultato è zero per tutti gli elementi dell'immagine (*pixel*), non vi è nulla da riconoscere. Appena il numero di pixel variati è abbastanza consistente, bisogna concentrare l'attenzione sulla parte di immagine che è variata: potrebbe essere la faccia di una persona da identificare o un libro da riconoscere. L'approccio è semplice ed efficacissimo; consente di risolvere nella maggioranza dei casi di interesse pratico uno dei più importanti problemi della visione, quello di segmentare l'immagine di una scena estraendo da essa solamente l'oggetto che interessa.

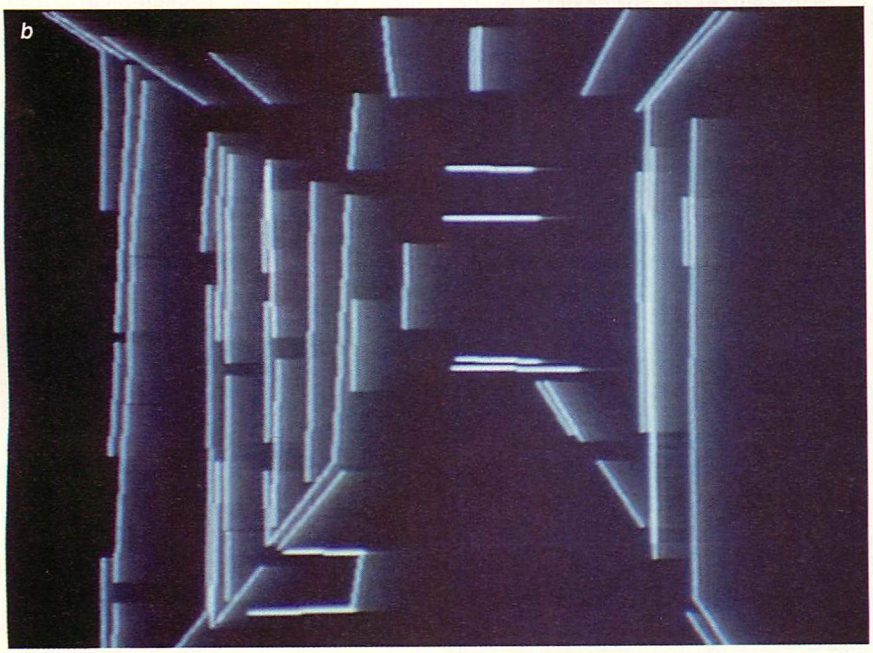
Anche in questo caso, l'analogia con i sistemi biologici è forte: alcuni animali vedono solo gli oggetti in movimento e anche nel sistema visivo dell'uomo vi sono neuroni, le cosiddette «cellule complesse» della corteccia visiva primaria, che rispondono sostanzialmente solo a stimoli provenienti da oggetti in movimento. La spiegazione potrebbe essere semplice: se tutto è fermo, non vi sono pericoli. Nessun problema per la sopravvivenza, né come prede né come predatori: nulla cui dare la caccia! Anzi, pare proprio che se non muovessimo gli occhi, non potremmo vedere le scene statiche: un'immagine ferma su una zona della retina per più di un secondo svanisce, non viene più percepita. Quando ci pare di fissare una scena statica, di fatto non teniamo gli occhi perfettamente fermi, ma facciamo loro eseguire dei piccoli movimenti (microsaccadi).

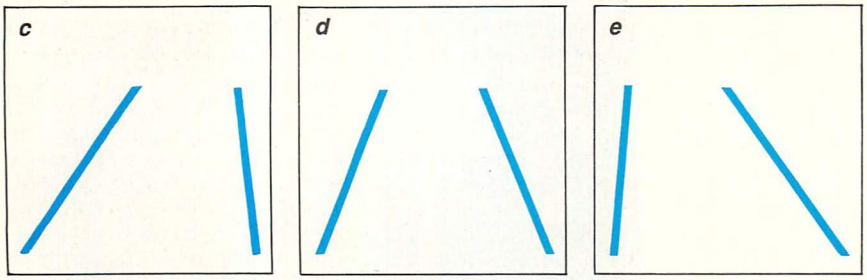
Per riconoscere un volto si procede dunque così: estratto il volto dallo sfondo e determinata la posizione delle pupille, l'immagine viene normalizzata e raddrizzata, in modo da ridurla a dimensioni standard (le stesse delle immagini memorizzate nella fase di apprendimento), ingrandendola se è troppo piccola e riducendola se è troppo grande. Si cerca poi l'immagine «più simile» fra quelle note, misurandone la correlazione (quanto si «sovrappongono» bene: sottraendo a un'immagine un'altra uguale, non rimane nulla; se ne sottraggo una simile, rimarrà poco!). Oppure si estraggono alcune caratteristiche tipiche (*si veda l'illustrazione nella pagina a fronte*). Anche le prestazioni sin qui ottenute sono molto incoraggianti: su un campione di 220 immagini facciali relative a 55 persone, il primo approccio ne riconosce il 100 per cento, con un tempo di elaborazione inferiore a 0,2 secondi per faccia; il secondo approccio ne riconosce oltre il 90 per cento, con tempi di elaborazione simili.

Anche i libri vengono riconosciuti dalla bibliotecaria elettronica usando due approcci alternativi e complementari. Il libro viene isolato dallo sfondo col



Per riconoscere i libri, la bibliotecaria elettronica scandisce riga per riga l'immagine della copertina dopo averla identificata all'interno della scena. L'istogramma ottenuto proiettando sull'asse verticale il numero di transizioni chiaro-scuro fornisce una descrizione della struttura grafica di solito sufficiente al riconoscimento. Analizzando anche l'istogramma orizzontale, nella sezione in cui tali transizioni si presentano in numero massimo, il potere discriminativo è tale da evitare, con i 500 libri sinora noti al sistema, errori. In questo caso il riconoscimento si configura come un processo di tipo «gestaltico». Un altro approccio estrae le righe di testo (anche sulla base degli istogrammi sopra illustrati) e riconosce i caratteri che le costituiscono: un procedimento necessario se il libro è mostrato al sistema per la prima volta.





Nella nuova tecnica di navigazione sperimentata sui robot di MAIA, la memoria prende il posto dell'elaborazione. Per quanto semplice, l'idea è estremamente efficace. L'immagine dell'ambiente, acquisita dalla telecamera (*a*), viene pre-elaborata estraendone gli spigoli principali (*b*). Il robot confronta quindi tale immagine con quelle memorizzate nella fase di addestramento, del tipo di quelle rappresentate in *c-e*, estrae la più simile e fornisce agli attuatori il comando di navigazione a essa associato. Per esempio, se l'immagine più simile è *c*, significa che il robot è troppo a destra: il comando associato a questa posizione è quindi «spostati a sinistra»; a *d* è invece associato il comando «vai diritto», a *e* il comando «spostati a destra».

metodo già illustrato: quando lo avvicino alla telecamera, la scena varia, e la parte variata è quella che mi interessa. Il primo approccio, il meno convenzionale, estrae un'informazione globale, legata alla struttura grafica della copertina del libro. Il secondo approccio, più classico, si basa sull'estrazione delle righe di testo (titolo, autore, editore eccetera) e sul riconoscimento dei caratteri che le compongono. In entrambi i casi l'immagine viene prima normalizzata, come nel caso delle facce: l'impresa è un po' meno complessa, data la semplicità geometrica del libro, che è sostanzialmente un rettangolo.

Linguaggio naturale, orale e scritto

Fin qui ho parlato di visione. Per svolgere le funzioni più sopra definite, il sistema MAIA deve anche essere in grado di comprendere il linguaggio naturale, per esempio l'italiano, sia parlato sia scritto, o comunque battuto su una tastiera. Deve inoltre generare testi orali e scritti. Deve, più in generale, poter interagire con operatori anche non specializzati, usando un'interfaccia multimediale che include, oltre al linguaggio parlato e scritto, il puntamento a immagini, la grafica, programmi di realtà virtuale eccetera. Il tutto per rendere il rapporto con MAIA il più gradevole possibile e per arricchirne le prestazioni comportamentali. Queste tematiche sono sviluppate da gruppi di ricercatori che operano in forte sinergia tra loro nei settori dell'elaborazione del linguaggio naturale, del riconoscimento e della sintesi del parlato, dei fattori umani, della rappresentazione delle conoscenze e del ragionamento meccanizzato.

Nel campo del riconoscimento del parlato, la ricerca che si svolge all'IRST è focalizzata sul modello del linguaggio. L'obiettivo finale è la realizzazione di un sottosistema di riconoscimento indipendente dal parlatore, che consenta a un utente di colloquiare con i bracci del sistema MAIA in parlato connesso (cioè parlando senza pause tra una parola e la successiva) e in condizioni di rumore piuttosto normali per un ambiente d'ufficio (i messaggi da riconoscere faranno tipicamente riferimento alle funzioni e ai compiti specifici previsti per il sistema MAIA).

Il gruppo di ricerca sull'elaborazione del linguaggio naturale, oltre alle attività legate al riconoscimento del parlato, sviluppa temi di grande interesse, quali la generazione di rapporti, l'elaborazione di testi e la traduzione semiautomatica. Oltre a dialogare con l'utente, le specifiche prevedono che il sistema MAIA sia in grado di stilare rapporti in linguaggio naturale su eventi accaduti o fornire descrizioni di situazioni anche complesse. Per esempio, l'utente può chiedere al concierge di reperire una persona o di inviare il robot in un ufficio a consegnare del materiale: al termine delle sue missioni, il sistema deve fornire all'utente i dovuti ragguagli sui compiti svol-

ti e su eventuali difficoltà incontrate.

Un'ulteriore componente che si ritiene di poter integrare è un sottosistema per l'elaborazione di testi. Si pensi a un sistema in grado di fare il riassunto delle notizie di maggior interesse per l'utente a partire da una serie di articoli di giornale. Oppure a un sistema che aiuti a ritrovare la giurisprudenza relativa a una certa legge. Lo sviluppo di tali sistemi richiede potenti strumenti di analisi linguistica, in parte diversi da quelli utilizzati per il dialogo. Con vincoli ancora maggiori, ci si propone di dotare il sistema della capacità di interagire con un utente straniero (inizialmente tramite il concierge e successivamente anche tramite la bibliotecaria elettronica) traducendo un testo nella sua lingua. Di grande importanza sono anche gli aspetti legati ai cosiddetti fattori umani: l'interfaccia uomo-sistema deve consentire all'utente di interagire con MAIA con modalità appartenenti al repertorio tipico delle relazioni umane.

Ho detto sopra che un sistema intelligente deve essere in grado di percepire direttamente l'ambiente che lo circonda (mediante sensori fisici di varia natura), e ho brevemente descritto il nostro approccio con riferimento, soprattutto, a problemi di visione e di dialogo. Per svolgere le funzioni richieste, il sistema MAIA deve però conoscere l'ambiente IRST non solo dal punto di vista fisico, ma anche dal punto di vista organizzativo. Ci si è quindi dedicati alla realizzazione di una «piattaforma» di conoscenze relative all'IRST fruibile sia dal sistema MAIA, sia direttamente dall'utente. Essenzialmente vengono considerati tre tipi di conoscenze: conoscenze strutturali (sulla struttura organizzativa, sul personale e sulle risorse non umane dell'Istituto); conoscenze procedurali (sulle normative adottate dall'organizzazione); modelli degli agenti (non solo informazioni sugli individui, ma anche informazioni che gli individui usano nello svolgimento della propria attività). Si tratta di conoscenze eterogenee, che richiedono metodologie di rappresentazione diverse, ma mutuamente trasparenti e facilmente aggiornabili.

Apprendimento, elaborazione e memoria

La piattaforma sperimentale di MAIA è dunque nata, e i primi frutti dell'integrazione cominciano a evidenziarsi. Molti comportamenti sono sin d'ora «ragionevoli» e le prossime tappe, ormai ben delineate, fanno prevedere una crescita del sistema sostanzialmente allineata con i piani. Ma secondo il nostro approccio, un comportamento in qualche modo intelligente richiede una spiccata capacità di evolvere autonomamente, imparando a interagire sempre meglio con l'ambiente, accumulando conoscenza ed esperienza, per poi usarla costruttivamente. In una parola: occorre una grande capacità di apprendimento. Non solo di dati e conoscenze semplici, come il rilevare la presenza di un nuovo mobile in un corridoio e di conseguenza aggiornare automaticamente la mappa, oppure acquisire l'immagine del volto di una persona prima mai vista, per poterla in seguito riconoscere; o ancora, aggiungere una parola nuova al vocabolario. Questi tipi di apprendimento sono già previsti nelle attuali specifiche di MAIA. Bisogna invece che il sistema sappia derivare dall'esperienza nuovi comportamenti, nuove strategie e quindi le tattiche per realizzarle. Nei sistemi di oggi, a ogni funzione corrispondono procedure, algoritmi *ad hoc* realizzati da appropriati programmi, magari flessibili e capaci di utilizzare dati e conoscenze acquisite con l'esperienza, ma comunque sempre programmi sviluppati dal progettista e non autonomamente dal sistema. Con questa impostazione, l'insieme dei comportamenti rimane sostanzialmente «chiuso», limitato a quelli previsti dal progettista. Occorre invece che il sistema possa apprendere nuove funzioni, che l'insieme dei suoi comportamenti sia «aperto» e continuamente aggiornabile sulla base dell'esperienza.

Attaccare e cercare almeno di scalfire questo problema è il nostro principale obiettivo scientifico per i prossimi anni. Appena lo si imposta, si è subito assaliti da un dubbio fondamentale. Se a ogni nuova funzione deve corrispondere una specifica procedura, il numero delle procedure, e quindi dei programmi, dovrà continuare a crescere. È davvero ragionevole? Se non altro: è pratico? E poi: saremo mai capaci di individuare un meccanismo così generale da essere in grado di derivare da qualsiasi insieme di esperienze le appropriate procedure? Esisterà, almeno concettualmente, un meccanismo inferenziale così potente? E anche se fosse, questa strada sarebbe percorribile praticamente?

Un sistema siffatto, con un numero di programmi che continua a crescere autonomamente, mi par proprio poco plausibile, complicato e assai poco gestibile! Ed ecco allora l'alternativa: sostituire la memoria all'elaborazione. Invece di eseguire calcoli di rotta misurando distanze da pareti e ostacoli, il robot impara a seguire la mezzeria del corridoio semplicemente associando a ogni immagine il comando di direzione impartitogli dall'istruttore. Dopo aver memorizzato un numero sufficiente di coppie immagine-comando, è in grado di navigare da solo, anche in ambienti sconosciuti. Gli basta estrarre dalla memoria l'immagine più «simile» a quella che sta «vedendo» e fornire agli attuatori il comando di direzione a essa associato (*si veda l'illustrazione nella pagina a fronte*).

Abbiamo potuto sperimentare che il robot naviga benissimo. Anzi, fa meno errori: l'approccio sembra più «affidabile» di quello basato su procedure e algoritmi di calcolo della rotta e più adatto ad affrontare situazioni impreviste. Se poi si dotasse il sistema di un elementare «surrogato dell'istinto di conservazione» grazie al quale ogni volta che il robot stesse per sbattere contro qualche ostacolo forzasse un comando nella direzione opposta al precedente e lo memorizzasse assieme all'immagine che sta vedendo, allora non servirebbe neppure un istruttore: il sistema imparerebbe a navigare da solo! Abbiamo così sostituito all'elaborazione delle misure di distanze e di calcolo della rotta (traiettoria) un processo mnemonico di associazione immagine-comando.

L'approccio sembra convincente, efficace e di una semplicità entusiasmante: viene subito voglia di generalizzarlo. Sostituire dappertutto l'elaborazione con la memoria! È ciò che si tenta di fare con gli approcci di tipo «connessionistico» oggi forse sin troppo di moda, basati sulle cosiddette reti neuronali, per la loro sia pur pallidissima somiglianza architetturale con le strutture biologiche del sistema nervoso. Anch'esse possono in qualche modo considerarsi alla stregua di memorie associative: per addestrarle basta fornire una serie di esempi e le relative risposte volute. La rete si modifica (variando per esempio i pesi delle connessioni tra i nodi) ed è poi capace di fornire la risposta corretta anche per stimoli un po' diversi da quelli corrispondenti agli esempi (come riconoscere una A stampata in stile Bodoni avendo imparato solo A dello stile New York!). Io credo che l'idea di fondo sia valida, ma la strada da percorrere perché le nostre reti possano approssimare da vicino le prestazioni delle reti di neuroni «vere» è ancora lunghissima.

Forse non si potrà proprio ridurre tutto a memoria (o forse sì). Ma questa è un'altra storia: un nuovo affascinante capitolo per la storia della intelligenza artificiale. Quale *trade-off* memoria-elaborazione risulterà vincente? Un tema affascinante, su cui si lavora in tutto il mondo e che ci aiuta anche a capire qualcosa di più sul nostro cervello, sull'intelligenza naturale.

(Da «Le Scienze» n. 290, ottobre 1992.)

LUIGI STRINGA *dirige l'IRST di Trento dal 1985. In precedenza ha insegnato alle università di Genova, di Roma e di Trento.*

Dal braccio industriale al robot mobile

di Vincenzo Tagliasco

Perché una macchina possa esibire comportamenti intelligenti deve disporre di strumenti per esplorare il mondo

Termini quali cibernetica, robotica, intelligenza artificiale, bionica, reti neurali, connessionismo, vita artificiale presentano ampie aree di sovrapposizione ed evocano suggestioni che rendono difficile definirne i contorni disciplinari. Inoltre le connotazioni offerte a questi termini dalla fantascienza e dai mass media hanno accentuato la confusione implicita in un settore che è stato, già nel corso dei secoli, oggetto di interesse letterario, e religioso: la costruzione di simulacri dell'essere umano e di altri organismi viventi.

A volte sono gli stessi ricercatori a lasciare vaghi i contorni interdisciplinari, specie in testi di natura divulgativa. Così nell'introduzione al libro *La robotica*, Marvin Minsky opera una implicita identificazione tra i termini «robotica» e «intelligenza artificiale» scrivendo: «L'argomento centrale di questo libro è l'intelligenza artificiale che è un'investigazione non solo sui computer e su nuovi tipi di macchine, ma anche sulla natura dell'intelligenza stessa». Per Minsky il tentativo di dare abilità umane a computer o di immettere buon senso nelle macchine sono aspetti della robotica.

Invece, per un ipotetico estensore di statistiche relative alla diffusione di robot sul mercato internazionale, la definizione di robot è molto più restrittiva e include sicuramente i manipolatori meccanici, più simili alle macchine utensili che non ai protagonisti di film come *Blade Runner* o *Terminator*. Proprio questi robot industriali sono stati i protagonisti (o meglio, i simboli), negli anni settanta e ottanta, delle modifiche del sistema di produzione all'interno delle fabbriche: anzi, si può affermare che il robot industriale sia stata la macchina utensile rappresentativa della transizione dalla fabbrica basata sulla catena di montaggio a quella gestita da reti di calcolatori.

D'altra parte, quando si deve stimare, per esempio, il fatturato mondiale dell'intelligenza artificiale, il settore viene spesso identificato con quello dei sistemi esperti nelle loro applicazioni finanziarie, bancarie e assicurative. L'intelligenza artificiale - intesa come la struttura da inserire in una macchina in modo da renderla «intelligente» come un essere umano - a tutt'oggi rimane ancora un'esigenza di nuovo paradigma scientifico, espressa da un nome di indubbia efficacia.

La British Robot Association definisce come robot industriale «un dispositivo riprogrammabile destinato a manipolare e trasportare parti, utensili o attrezzi specializzati mediante movimenti variabili programmati per l'esecuzione di specifici compiti produttivi». La definizione usata dal Robot Insitute of America parla di «un manipolatore riprogrammabile multifunzionale destinato a movimentare materiali, parti utensili o altri attrezzi specializzati mediante movimenti variabili programmati per l'esecuzione di una varietà di compiti». Peter B. Scott in *La rivoluzione robotica* sostiene che «per lo stadio attuale di evoluzione del robot industriale questo può essere meglio definito come un braccio-robot».

Eppure, quel dispositivo industriale che George Devol brevettò nel 1954 e che attualmente viene considerato come il primo robot industriale non rassomigliava nemmeno a un braccio-robot: in realtà era stato presentato all'ufficio brevetti come un manipolatore non specializzato. Solo nel 1958 il robot di Devol venne effettivamente costruito. Successivamente Devol vendette i suoi primi brevetti alla Condec, che si trasformò in Unimation (da *Uni*versal auto*mation*), diretta da John Engelberger, per diventare, nel 1972, la prima ditta al mondo a dedicarsi esclusivamente alla produzione di robot. Poi, nel 1974, la Cincinnati Milacron produsse il T3, il primo robot comandato da microcalcolatore disponibile commercialmente.

Quindi, nel trattare di robotica ci si muove tra due estremi opposti: l'idea di robot così come ci viene tramandata dalla tradizione umanistico-letteraria e le *realizzazioni* di robot effettuate da laboratori di ricerca o addirittura prodotte industrialmente.

È da sottolineare tuttavia che proprio nel dramma di Karel Čapek *R.U.R.: Rossum's Universal Robots* - scritto nel 1920 e messo in scena nel 1921, cui tutti attribuiscono la primogenitura del termine robot (prima di allora si parlava di automi) - i robot sono degli esseri costruiti con materiale organico vivente (oggi verrebbero definiti androidi o cyborg)

Racconta il protagonista del dramma di Čapek: «Il vecchio Rossum cercò di imitare con una sintesi chimica la sostanza viva detta protoplasma finché un bel giorno scoprì una sostanza il cui comportamento era del tutto uguale a quello della sostanza viva... Dapprincipio tentò di fare un cane artificiale... e poi si diede alla formazione dell'uomo... L'ingegnere Rossum, il nipote del vecchio disse: - È assurdo fabbricare un uomo in dieci anni, (quasi quanto ne impiega la natura) - ...

Il giovane Rossum rappresentava l'epoca della produzione, dopo quella della conoscenza... Il giovane Rossum inventò l'operaio con il minor numero di bisogni. Dovette semplificarlo. Eliminò tutto quello che non serviva direttamente al lavoro. Insomma, eliminò l'uomo e fabbricò il Robot... Dal punto di vista meccanico sono più perfetti di noi, hanno una straordinaria intelligenza razionale, ma sono privi di anima».

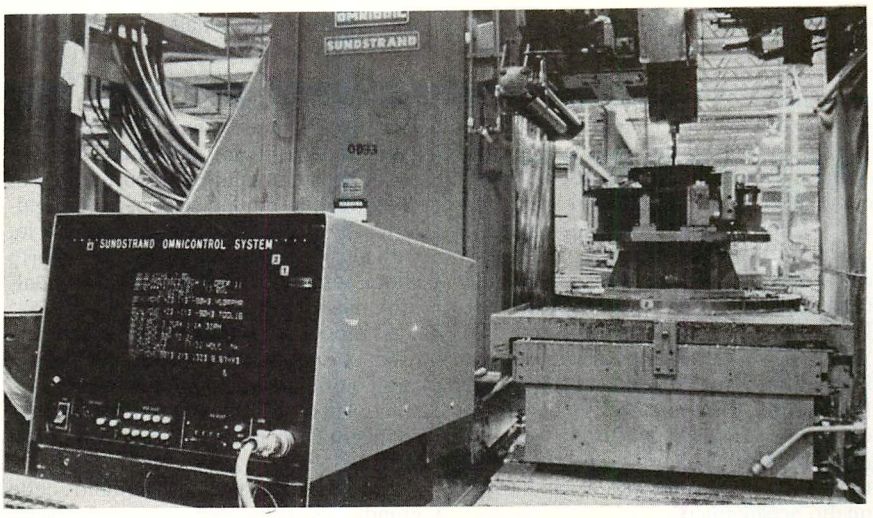
Il robot industriale recupera del termine originale (*robota*) l'essere destinato al «lavoro», a compiere le attività di un operaio. Ogni riferimento all'antropomorfismo o zoomorfismo viene rifiutato: il robot industriale, all'inizio della sua storia, è una macchina utensile, forse una sua appendice, sicuramente un «servitore» meccanico delle macchine utensili che devono venire correttamente alimentate.

La specie robot non presenta uno sviluppo filogenetico lineare. Anzi, molti si chiedono se gli attuali robot industriali appartengano a quella categoria di macchine che i primi «visionari» (W. R. Ashby, W. Grey Walter) identificavano con i cosiddetti organismi artificiali, tipici della tradizione dei costruttori di automi del Settecento.

Ciò avveniva nell'immediato secondo dopoguerra, quando ad alcune delle prime macchine cibernetiche si potrebbe far risalire l'inizio sostanziale della robotica intesa in senso lato e non limitata ai manipolatori industriali. L'omeostato di W. R. Ashby (1948); la *machina speculatrix* o tartaruga CORA (Conditioned Reflex Analogue) di W. Grey Walter (1950); lo Szeged ladybird di D. Muszka (1950); la *machina docilis* (presentata come un modello del riflesso di Pavlov) di W. Grey Walter (1951); lo scoiattolo artificiale Squee di Jensen, Koff e Szabó (1951); il topolino nel labirinto di C. E. Shannon (1952); il ratto da labirinto di I. P. Howard (1953); la tartaruga viennese di E. Eichler (1955).

Queste macchine cibernetiche - la cui caratteristica principale è la locomozione piuttosto che la manipolazione - hanno la loro origine nella traiettoria iniziata negli anni trenta, quando il panorama tecnologico venne modificato dalla comparsa dell'elettronica. L'amplificatore elettronico era in grado di permettere il collegamento tra il segnale, portatore della rappresentazione di movimento, e i motori elettrici che dovevano realizzare fisicamente tale movimento. Era la prima volta che un evento del genere si verificava nella storia della costruzione di macchine. Prima di allora bisognava creare opportune strutture meccaniche e sofisticati cinematismi per poter introdurre nella macchina le sequenze operative che avrebbero dato luogo ai movimenti e ai comportamenti della macchina stessa: la parte di controllo e la parte di attuazione erano strettamente integrate l'una con l'altra ed erano realizzate con le stesse tecnologie meccaniche. Solo l'avvento dell'elettronica fece intravvedere la possibilità di separare l'architettura del dispositivo meccanico dal sistema preposto al suo controllo: nasceva, di fatto, la metafora del corpo (macchina) seperata da quella del cervello (struttura di gestione e controllo).

Negli anni cinquanta, lo sviluppo della robotica, come disciplina tecnologica, coincide con l'avvento della robotica industriale. Se «il cervello» del robot venisse identificato con la struttura di gestione e controllo, si potrebbe parlare, anche per il robot industriale, di corpo-mente. In realtà, teoricamente, la disciplina definita «controlli automatici» si interessò, continuando il confronto con i sistemi biologici, più dei riflessi spinali che della mente vera e propria. Di alcune prestazioni tipiche della mente, da costruire nei laboratori ma al di fuori del settore dei robot industriali, si sarebbero occupate altre discipline, più strettamente collegate all'informatica.



Un impianto di trapanazione robotizzato in un centro di lavorazione pesante della Ingersoll-Rand, in funzione agli inizi degli anni settanta.

Infatti la nascita, quasi contemporanea, dell'intelligenza artificiale e della psicologia cognitiva, nel 1956, costituisce un segno non ambiguo di una chiara preferenza verso un approccio *top-down* nello studio della simulazione dei comportamenti dei vari organismi, naturali o artificiali. Si preferisce studiare le attività intellettuali più sofisticate dell'essere umano (quali il ragionamento, la logica, le tecniche di risoluzione dei problemi) piuttosto che affrontare i problemi afferenti alle prestazioni sensoriali e motorie. Conseguentemente anche il tema dell'apprendimento dei comportamenti, caro alla prima cibernetica, viene accantonato. Recentemente, Rodney Brooks ha ripreso questa tematica affermando che si può avere «apprendimento» anche quando un organismo interagisce soltanto con l'ambiente o altri suoi simili: «un verme e un elefante sono in grado di rendere nell'interazione con l'ambiente anche se non sono capaci di giocare a scacchi».

L'affermarsi della robotica industriale, da un lato, e dell'intelligenza artificiale, dall'altro, potevano anche essere interpretati, durante gli anni settanta, come il desiderio di effettuare una separazione tra corpo e mente nella progettazione di organismi artificiali. Era un periodo caratterizzato da grandi entusiasmi, in cui le definizioni erano ancora sfumate o volutamente vaghe. L'intelligenza artificiale chiarirà, in seguito, di non essersi mai posta il problema di imitare l'intelligenza umana per fornire l'intelligenza a una macchina fisica, costruita dall'uomo, in grado di interagire col mondo esterno.

Se si rileggono gli articoli dell'epoca, sembra quasi che per fare evolvere la mente artificiale i primi rudimentali organismi - costruiti da W. Grey Walter e altri progettisti di macchine cibernetiche negli anni quaranta e cinquanta - siano stati costretti a perdere gambe e ruote per diventare puro software.

A partire dagli anni sessanta tartarughe, topi e rane artificiali, progettati dai primi cibernetici per studiare i processi di apprendimento nell'interazione tra un corpo e l'ambiente, vengono rapidamente dimenticati.

Eppure la cibernetica e la bionica avevano tentato di gettare un ponte tra biologia e ingegneria per ottenere una migliore comprensione del funzionamento di organismi artificiali e naturali. Esse avevano rappresentato, in un certo periodo del loro sviluppo, il tentativo di superare lo iato tra scienza e tecnologia. Invece di porre l'enfasi sul ruolo della tecnologia quando costruisce organismi artificiali, si era preferito giustificare la progettazione di macchine ispirate a modelli biologici con l'aspirazione a una migliore comprensione dei sistemi naturali.

La cibernetica non raggiunse mai il potere scientifico e tecnologico necessario per attivare grandi programmi o progetti. Al contrario, per quanto concerne le politiche di finanziamento nel settore della ricerca e sviluppo, sono state le intrinseche potenzialità tecnologiche dei robot nel settore dell'industria manifatturiera a determinare tempi e ritmi di sviluppo.

È paradigmatico che quasi tutte le analisi dell'impatto economico e sociale dei robot abbiano coinciso praticamente con lo studio degli effetti della robotizzazione industriale.

L'idea prevalente negli anni settanta era quella di far evolvere robotica industriale e intelligenza artificiale separatamente: poi qualche demiurgo scienziato sarebbe riuscito a operare la sintesi. Ma questa impostazione ha avuto soprattutto una valenza nominalistica, attribuendo all'intelligenza artificiale contenuti più legati alla mera interpretazione semanti-

ca del suo nome, piuttosto che alle attività realmente svolte presso i vari laboratori di intelligenza artificiale e pubblicate sulle riviste specializzate. L'intelligenza artificiale non ha mai avuto la pretesa di diventare l'intelligenza alla base del comportamento di un robot, inteso come un organismo dotato di vita artificiale. L'intelligenza artificiale ha preferito porsi l'obiettivo di ricreare in macchine informatiche le prestazioni delle capacità intellettive più elevate dell'uomo.

Nondimeno, nell'arco di due decenni la robotica industriale, che si può identificare con i manipolatori meccanici più o meno intelligenti, è riuscita ad assumere un proprio statuto disciplinare, tanto sul versante industriale, quanto su quello accademico.

La struttura culturale della disciplina è ormai scolpita nei capitoli dei vari manuali che hanno raggiunto, durante gli anni ottanta, una organizzazione del sapere quasi definitiva, sicuramente ripetitiva: la cinematica e la dinamica del braccio meccanico, gli attuatori e i sensori, i metodi di controllo, i linguaggi di manipolazione. Il concetto di manipolazione diviene centrale nell'ambito della robotica industriale.

Molti insegnamenti universitari vengono offerti secondo lo stesso schema, in cui è il sistema braccio-manipolatore a costituire il principale oggetto di studio.

Ancora all'inizio degli anni ottanta, i robot erano considerati il simbolo della futura fabbrica «senza uomini», dove molti problemi di produttività avrebbero trovato morbide ed efficienti soluzioni. L'acme di questa ideologia si ebbe nel biennio 1984-85, quando sul mercato statunitense venne raggiunto il picco più alto nel numero di ordinazioni di nuovi robot. Nell'inconscio collettivo la robotica industriale divenne così sinonimo di robotica, operando una netta cesura rispetto alle connotazioni della fantascienza. Il «New York Index» iniziò a citare insieme i termini «robotica», «automazione» e «fabbrica automatica».

Ma verso la metà degli anni ottanta i manager delle imprese industriali si resero conto che il processo di robotizzazione di un impianto non poteva esaurirsi nella semplice sostituzione di ogni operaio con un robot, senza modificare né l'intera organizzazione del lavoro, né la catena di montaggio. Si diffuse tra il management industriale quello che sarebbe poi diventato uno slogan: «Non si tratta di far uscire un operaio e far entrare al suo posto un robot: si tratta di progettare *ex novo* l'intero processo manifatturiero». A questo punto gli ingenti investimenti richiesti per la progettazione di nuove generazioni di robot vennero a mancare.

L'evoluzione del robot industriale, nell'accezione di sistema in grado di manipolare oggetti, perviene, alla fine degli anni ottanta, a una fase di riflessione. Ovviamente, continuano a svilupparsi i suoi vari componenti costitutivi, spinti dal mercato e dallo sviluppo della tecnologia, ma è indubbio che il robot industriale trova nel costo del lavoratore che dovrebbe andare a sostituire un limite difficilmente superabile. Si continuano a denominare robot strutture molto sofisticate in grado di costruire in modo autonomo grattacieli o perforare gallerie, ma l'idea del robot industriale legato al concetto di automa antropomorfo sfuma sempre di più, allontanandosi dalle immagini care alla fantascienza.

Esistono particolari componenti del robot che continuano a ispirarsi a prestazioni dell'essere umano: macchine di visione, attuatori molto sofisticati, strutture in grado di imitare alcuni comportamenti.

Ma il robot-sistema, simbolo delle grandi ristrutturazioni industriali tra gli anni settanta e ottanta, non è più protagonista nel modello tecnocentrico del CIM (Computer Integrated Manufacturing). Anche nella fase più recente all'insegna di un approccio antropocentrico - del quale la metodologia CHIM (Computer and Human Integrated Manufacturing) è una delle espressioni più significative - il ruolo del robot industriale diventa sempre più marginale.

A causa dei ripensamenti sul ruolo del robot in fabbrica, stiamo attualmente assistendo (al di là dei classici cicli economici recessivi) a un rallentamento nella crescita della robotica industriale. Tuttavia l'industria della robotica potrebbe avere spazi di mercato anche al di fuori delle applicazioni di fabbrica.

Esistono precise indicazioni tendenti ad avallare l'ipotesi che il settore dei servizi possa liberare l'industria della robotica dalla pesante ipoteca culturale imposta dalla committenza industriale. «Esiste un numero incredibile di opportunità nell'area dei servizi, dove è presente circa il 75% del lavoro da fare - sostiene Joseph Engelberger, pioniere e un tempo accanito paladino dell'uso industriale dei robot - noi prevediamo interessanti applicazioni nei settori della grande distribuzione, della ristorazione, delle lavanderie, dell'assistenza ospedaliera e domiciliare».

Engelberger include nella stessa area tecnologica anche i robot da impiegarsi a fini di pubblica utilità; per esempio, nel settore della protezione civile (catastrofi naturali o provocate dall'uomo). È evidente che l'interesse al settore dei servizi è ascrivibile non solo all'importanza del settore terziario nell'attuale fase di sviluppo delle società altamente industrializzate, ma anche ai bassi tassi di produttività che caratterizzano il terziario dei servizi rispetto al secondario dell'industria.

I progenitori di questi nuovi robot sono i telemanipolatori, usati negli impianti nucleari per la gestione di sostanze radioattive e quella miriade di dispositivi atti ad assistere esseri umani in situazioni difficili e pericolose. In questo contesto, è naturale chiedersi quale tipologia di robot sarà richiesta dal terziario e in che relazione i futuri robot dovranno collocarsi rispetto agli attuali robot industriali. Senza dubbio il ritmo di sviluppo di questo robot è stato, finora, nettamente inferiore rispetto a quello dei loro colleghi strettamente industriali.

Si potrebbe arguire che alla base di queste differenze ci siano importanti motivazioni di carattere economico e finanziario; ma non si tratta solo di questo. C'è una ragione più profonda che è correlata alla natura intrinseca della robotica. La robotizzazione dei processi industriali non ha rappresentato un evento rivoluzionario. È stata piuttosto la ricaduta nei processi manufatturieri di un flusso continuo di innovazioni tecnologiche che hanno alimentato la veloce modernizzazione dell'industria dopo la seconda guerra mondiale.

I servomeccanismi, le macchine a controllo numerico, i microprocessori sono i componenti di base degli attuali robot industriali. A ogni livello di sviluppo tecnologico, lo iato tra potenzialità tecnologiche e applicazioni industriali è stato colmato dall'ingegneria di produzione, che ha progressivamente modificato l'ambiente di fabbrica per tener conto dell'evoluzione delle tecniche messa a disposizione dal mercato.

Da un punto di vista strettamente culturale, questo è un processo che si autoalimenta e che non richiede una sostanziale simbiosi con la comunità scientifica, a eccezione degli aspetti educativi e formativi: in altre parole, si può tranquillamente affermare che la robotica industriale è caratterizzata prevalentemente da un elevato contenuto tecnologico.

È indubbio che i grandi successi della robotica industriale negli anni settanta e ottanta hanno condizionato le ricerche nel settore dei corpi da fornire alle macchine intelligenti. Si può ragionevolmente ritenere che il diminuito interesse, in tali periodi, verso la bionica e la cibernetica (che proponevano altre architetture corporee) non fosse da ascriversi solo al pudore (o vergogna) da parte di ricercatori e agenzie di finanziamento di usare termini ormai dominio dei *serial* televisivi di fantascienza: l'emergere prepotente della robotica industriale tendeva a incorporare in tale settore tutta la robotica e le discipline a essa collegate. Solo quando, all'inizio degli anni ottanta, la robotica industriale diventa una disciplina assestata e altamente strutturata, con propri corsi universitari e relativi manuali e, al contempo, le piccole aziende di robotica vengono assorbite dai grandi gruppi industriali automobilistici o elettromeccanici (Engelberger vende Unimation), si aprono oggettivi orizzonti ai robot, differenti e anomali rispetto al loro ambiente tradizionale, ossia la fabbrica.

Quasi contemporaneamente, negli Stati Uniti, in Europa e in Giappone si intravvedono i nuovi settori applicativi fuori dalla fabbrica.

In Europa il programma EUREKA, ispirato dal Presidente francese Mitterand, pone l'enfasi su questi aspetti non con-

venzionali della robotica: per esempio, nel settore della protezione civile. In Giappone, il primo convegno, nel 1983, sulla robotica avanzata riesce anche a datare la storica svolta di una visione meno «fabbricocentrica» della robotica.

L'intelligenza artificiale aveva scelto di svincolarsi dal confronto reale con l'ambiente circostante, preferendo la simulazione alla costruzione di oggetti fisici interagenti con l'esterno. Anzi, in recenti analisi critiche sull'intelligenza artificiale si osserva che il momento di stallo in cui si trova attualmente la disciplina potrebbe essere imputabile alla difficoltà di gestire - secondo le classiche metodologie - alcuni tra i temi centrali dell'interazione di forme viventi con l'ambiente: l'apprendimento e la rappresentazione del mondo esterno. Se ciò risultasse vero, potrebbe diventare paradigmatico il ruolo della robotica intesa come la disciplina che, nell'ambito delle forme di intelligenza costruite dall'essere umano, sposta il centro dell'attenzione dalla simulazione alla costruzione di oggetti reali che devono agire in ambienti «non ordinati». In questo caso le prestazioni richieste sono operative e funzionali; ossia l'approccio strettamente computazionale dovrebbe lasciare gradualmente spazio alla progettazione e alla costruzione di sistemi in grado di muoversi e agire in ambienti non strutturati («sporchi»).

L'attitudine a muoversi, ossia la mobilità, diviene essenziale per lo sviluppo di comportamenti e per attuare forme di apprendimento simili a quelle di alcuni organismi biologici.

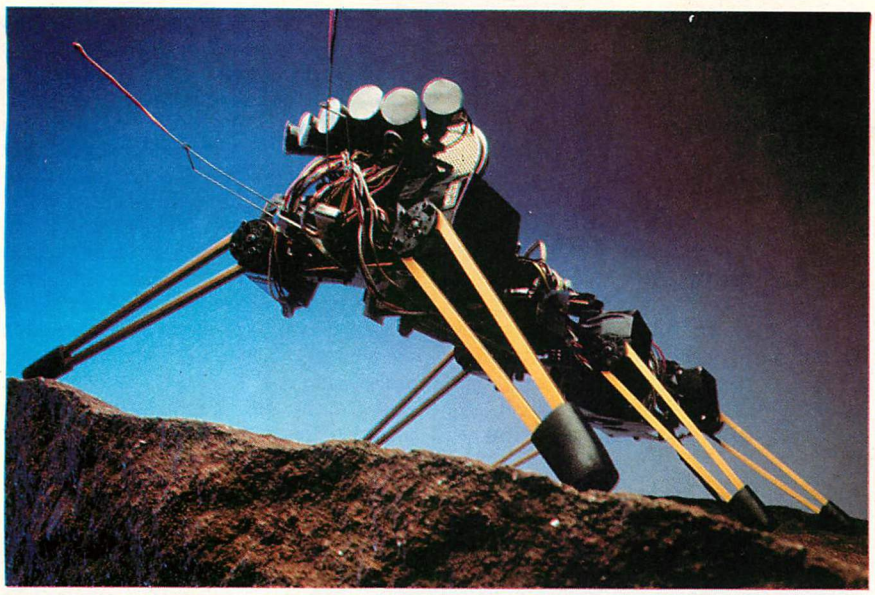
La conseguenza di tale prospettiva consisterà nella perdita del ruolo dominante della simulazione che verrà confinata nell'area protetta della teoria: solo allora l'intelligenza costruita (*crafted intelligence*) si potrà appropriare di un corpo col quale affrontare l'infinita variabilità del mondo in cui dovrà operare. O meglio, si dovrà iniziare a parlare di comportamenti intelligenti, piuttosto che di intelligenza sia naturale che artificiale. O addirittura, sarà più prudente parlare di immissione di comportamenti, *tout court*, nelle macchine. In altre parole, analogamente a quello che è avvenuto durante l'evoluzione biologica, insieme a comportamenti innati si dovranno progettare comportamenti che possono essere appresi e perfezionati quando il sistema si muove e interagisce con l'esterno.

Il progenitore dei robot mobili può venire considerato il robot Shakey, messo a punto presso lo Stanford Research Institute verso la fine degli anni sessanta. Shakey, denominato in questo modo per la sua andatura traballante, era un dispositivo comandato via radio, controllato da un computer e mobile su ruote. Inoltre era fornito di telecamera e di altri sensori. Proprio i dati provenienti da tali sensori e dalla telecamera permettevano a Shakey di progettare ed eventualmente modificare i suoi piani di azione. Shakey non aveva braccia, eppure fin dall'inizio venne considerato un robot, anche se poteva piuttosto venire considerato come un laboratorio mobile di ricerche in intelligenza artificiale.

Invece, la recente riscoperta delle reti neurali potrebbe essere interpretata come un tentativo di ritornare alle origini per trovare ispirazione, piuttosto che nelle più sofisticate attività cognitive umane, nelle funzioni nervose elementari di organismi viventi. Nell'approccio classico dell'intelligenza artificiale, l'enfasi era posta sul ragionamento; nell'approccio connessionistico, l'attenzione si concentra sull'apprendimento, sul riconoscimento, sulla navigazione. Al contrario del ragionamento - dove il riferimento per eccellenza è il cervello umano - l'apprendimento è riscontrabile anche nei sistemi nervosi rudimentali, quali quelli di nematodi o di scarafaggi. Eppure lo scarafaggio è un animale il cui comportamento è estremamente efficace per quanto concerne la capacità di evitare pericoli ed elaborare strategie differenziate di sopravvivenza. Così il nematode *Caenorhabditis elegans*, un piccolo verme lungo circa mezzo millimetro, pur essendo formato da sole 959 cellule, di cui 302 sono cellule nervose, presenta elementari prestazioni di apprendimento associativo.

Il ritorno alle origini, ossia ai primi maldestri tentativi della cibernetica, as-

Dotato di telecamere e sensori, il robot Odex TM III realizzato per conto della Commissione per l'energia atomica francese è in grado di spostarsi negli ambienti non accessibili all'uomo di una centrale nucleare e verificare eventuali guasti.



Grazie a sensori a raggi infrarossi, Gengis, insetto-robot realizzato da Rodney Brooks, è in grado di evitare gli ostacoli e di avvicinarsi di soppiatto alle persone.

sume sempre più la connotazione di un ritorno allo studio del comportamento degli organismi piuttosto che allo studio di attività cognitive superiori. I robot cellulari (tra cui i «robot a perdere», di costo contenuto e in grado di lavorare insieme), che vengono oggi studiati anche nei loro comportamenti «sociali», ricordano in modo significativo le tartarughe elettroniche di W. Grey Walter che, negli anni cinquanta, avevano evocato analoghe suggestioni.

Quindi, per la realizzazione dell'antico sogno dell'umanità di costruire macchine «intelligenti» si dovrà operare più nell'ambito della progettazione e della costruzione del corpo piuttosto che non in quello della valorizzazione esclusiva del ruolo della mente. In questo contesto è naturale la rivisitazione del ruolo di discipline come la cibernetica e la bionica. Caratteristica distintiva, ma comune, di molti progetti nati in tali contesti è sempre stata quella dell'integrazione: costruire il corpo di una macchina che presenta un certo comportamento implica la progettazione articolata di più sottosistemi, tra loro diversi, ma finalizzati al raggiungimento di obiettivi precisi.

Nell'ambito delle scienze dell'artificiale viene riproposto l'affascinante tema dell'impossibilità della separazione del cervello dal corpo in cui vive: può il robot essere dotato di ragionamento senza che gli si forniscano gli strumenti percettivi e motori mediante i quali può apprendere ed esplorare il mondo che lo circonda?

Nel breve termine, in merito alla necessità di immettere intelligenza nelle macchine, le tendenze appaiono diametralmente opposte rispetto al passato. Un tempo l'ingegnere dell'intelligenza - ossia colui che si poneva, e si pone, il problema di costruire intelligenza - partiva dal desiderio di simulare e di emulare le attività mentali più sofisticate. Oggi segue un approccio più coerente a una visione filogenetica per la robotica: prima di insegnare a un robot a giocare a scacchi cerca di insegnarli a muoversi, a vedere, a sentire. Nell'evoluzione delle macchine intelligenti si è cercato di saltare intere generazioni di macchine più modeste, ma in grado di fornire preziosi stimoli per capire come gli organismi biologici interagiscono con l'ambiente attraverso la percezione, la locomozione, la manipolazione. Andando a rileggere gli atti dei primi convegni sulla bionica, tenuti nei primi anni sessanta, si può facilmente verificare che molte suggestioni di allora sono ancora attuali. Almeno per quanto concerne le macchine, si è potuto verificare che una intelligenza senza un corpo che le permetta di confrontarsi e di interagire col mondo esterno si arena di fronte agli usuali problemi del vivere quotidiano (il cosiddetto buon senso, il sapere euristico, l'insieme delle conoscenze e delle attitudini che ci permettono di sopravvivere).

È forse per questi motivi che i *robot beings* (esseri robotici) oggi progettati da R. Brooks al Massachusetts Institute of Technology si basano su una stretta connessione tra percezione e azione («embedding robots concretely in the world»), in grado di mettere in atto meccanismi autonomi di apprendimento.

Nel saggio *Elephants Don't Play Chess* Brooks scrive: «Per costruire un sistema intelligente è necessario avere le sue rappresentazioni intimamente fondate nel mondo fisico. L'osservazione chiave è che il mondo è il suo migliore modello. Esso è sempre aggiornato. Contiene ogni dettaglio che si vuole conoscere. Il trucco consiste nel percepirlo nel modo più appropriato e abbastanza frequentemente. Per costruire un tale tipo di sistema è necessario connetterlo al mondo fisico attraverso un opportuno insieme di sensori e di attuatori».

Anche nel robot intelligente, come in altri organismi biologici naturali, occorre ricreare non solo una ontogenesi che riassuma un preciso percorso filogenetico, ma anche una infanzia, che gli permetta di mettere a punto autonomi processi di apprendimento e di adattamento all'ambiente in cui sarà destinato a vivere.

Il ricercatore di intelligenza artificiale si muove in una zona di ricerca aperta alla creatività: non «scopre» qualcosa che prima si ignorava o di cui non si riusciva a dimostrare l'esistenza (un virus, una particella subatomica, la causa di una malattia, un nuovo materiale superconduttore), bensì tenta di costruire programmi su calcolatore in grado di emulare comportamenti e prestazioni tipiche degli esseri intelligenti. I diversi gruppi accademici e le varie organizzazioni industriali e commerciali offrono definizioni di questa disciplina molto suggestive: l'intelligenza artificiale si propone di far fare alle macchine cose che richiederebbero intelligenza se fossero fatte dall'uomo; l'intelligenza artificiale è lo studio delle facoltà mentali dell'uomo attraverso modelli computazionali; l'intelligenza artificiale è qualsiasi cosa i calcolatori non possono «ancora» fare.

Purtroppo l'intrinseca ambiguità del termine intelligenza (naturale) - che d'altra parte è stata alla base del successo del nome stesso di «intelligenza artificiale» - ha dato luogo a tutta una serie di interrogativi, ricchi di suggestione. Mentre ci esaltiamo per l'intelligenza del cane che si «siede» interpretando correttamente il comando del padrone, etichettiamo con uno sbrigativo epiteto di «stupido veloce» il calcolatore che svolge perfettamente il lavoro che veniva eseguito, non più di trenta anni fa, da schiere di contabili.

La presenza di numerose connessioni con altre discipline fa optare per una definizione più operativa di intelligenza artificiale, adottata anche dalla comunità accademica: l'intelligenza artificiale è, in un certo momento storico, l'insieme degli argomenti di informatica che sono oggetto delle maggiori riviste e dei congressi internazionali che si riconoscono in tale termine.

Negli ultimi cinquemila anni di storia dell'umanità pensatori (filosofi, teologi e logici) hanno affrontato tematiche analoghe, ma solo oggi i ricercatori di intelligenza artificiale hanno finalmente a disposizione mezzi strumentali tali da permettere di costruire, attraverso l'impiego del calcolatore, veri e propri laboratori di idee.

Tuttavia è indubbio che il grande successo della disciplina sia da attribuirsi a quelle applicazioni finalizzate alla costruzione di sistemi di carattere medico, economico e industriale. Paradossalmente, l'intelligenza artificiale è diventata una occasione di richiamo culturale soltanto quando è stata usata come lo strumento operativo che meglio soddisfa le esigenze della fase di sviluppo della

società industriale. Ma proprio nel momento in cui l'intelligenza artificiale ha riscosso i maggiori successi attraverso i cosiddetti sistemi esperti, si sono avvertite le vere difficoltà relative all'introduzione, nella macchina-robot, di alcune semplici prestazioni dell'essere umano quali le problematiche del riconoscimento e del buonsenso.

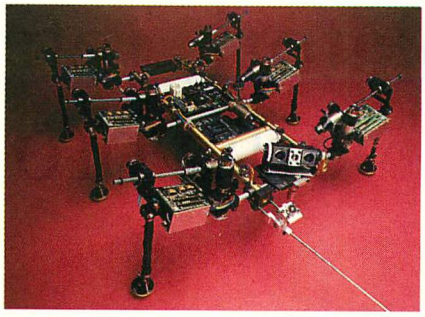
D'altra parte, se si analizzano le varie definizioni e analisi di quel coacervo di caratteristiche e di prestazioni che nel corso dei secoli il senso comune e il mondo della cultura hanno elaborato con il nome intelligenza, è possibile verificare l'inconsistenza e la vaghezza di questa definizione.

La stessa distinzione tra intelligenza artificiale debole e forte suggerisce la pericolosità dell'adozione, a priori, del termine intelligenza, specialmente quando lo si utilizza suggerendo una «chiara» distinzione tra mente e corpo. Eppure si sarebbe dovuto ricordare che la definizione dell'intelligenza naturale è un continuo divenire, sollecitato da modificazioni culturali e sociali. D'altra parte, alcuni autori sostengono che l'intelligenza, a volte, può essere valutata appieno solo attraverso un approccio ecologico, in quanto essa si manifesta attraverso l'interazione tra più soggetti: una intelligenza solitaria non può essere né percepita, né valutata.

Micheal Heather si interrogava: «Come dobbiamo definire l'intelligenza? È collegata alla vita? E cosa si può dire della vita intelligente? Esiste vita-non-intelligente o intelligente-non-vita? Ci sono alcuni che mettono in guardia contro il costume di dare una definizione della vita e dell'intelligenza: non si rendono conto che, di fatto, essi propongono definizioni di questa entità e le definiscono come non-definibili».

Il collegamento tra vita e intelligenza, nel passato, ha suscitato un interesse marginale. L'intelligenza, per antonomasia, era solo quella umana, e aggettivare con intelligente il comportamento di alcuni animali sfiorava un consapevole paradosso. Heather, tra le tante definizioni di intelligenza, privilegia quella elaborata da H. A. Fatmi e R. W. Young, per i quali l'intelligenza è quella facoltà (della mente) attraverso cui l'ordine viene percepito in una situazione precedentemente considerata disordinata.

È indubbio che anche in questo caso prevale l'aspetto antropomorfico dell'intelligenza naturale, come d'altra parte viene assiomatizzato dal test di Turing, per cui una macchina è intelligente quando la comunicazione con essa non si può distinguere da quella con un essere umano.



Con le sue sei zampe controllate da 25 motori e 150 sensori Attila è in grado di camminare su ogni tipo di terreno.

Howard Gardner sottolinea la pluralità dell'intelligenza nell'essere umano, evidenziando diverse *formae mentis*: intelligenza linguistica, musicale, logico-matematica, spaziale, corporeo-cinestesica, interpersonale, intrapersonale.

J. P. Guilford propose, già nel 1950, un modello di intelligenza formato da una struttura tridimensionale (6x5x4) che dà luogo a 120 aspetti diversi. Altre volte, per eliminare a priori interfacce con altri aspetti della vita di relazione, i costruttori di macchine cosiddette intelligenti cercano di separare gli aspetti legati alla fisicità dell'organismo da quelli afferenti alla sfera delle emozioni e della emotività. M. W. Thring ha elaborato, per esempio, la «teoria dei tre cervelli» fisico, intellettivo ed emotivo: «Un operaio, in fabbrica, può eseguire compiti di routine usando mani e occhi, attraverso il "cervello fisico", mentre immagina di conversare con qualcuno nel suo "cervello intellettivo"; tutto questo in una atmosfera di profonda depressione o noia promossa del suo "cervello emotivo"».

Inoltre, il recente emergere delle metafore «cervello-ghiandola» o «cervello-reti-neurali», secondo le quali il pensiero e le varie forme di intelligenza non sono separabili dalle particolari architetture nervose e biochimiche che costituiscono il cervello stesso, attenua il fascino della metafora «cervello-calcolatore». Tuttavia per quanto concerne l'intelligenza legata alla robotica, attualmente ci troviamo di fronte a due strade diverse. Da una parte si cerca, attraverso la disciplina denominata «Vita Artificiale» di simulare comportamenti *lifelike*, a partire anche dalle forme biologiche più semplici ed elementari.

Dall'altra parte gli studiosi di intelligenza artificiale estendono i confini della disciplina per inglobare i comportamenti più o meno intelligenti. Correttamente, Tomaso Poggio in *L'occhio e il cervello* si pone il problema degli strani percorsi che il termine intelligenza ha avuto nel suo divenire: «Tradizionalmente la ricerca sull'intelligenza artificiale ha affrontato capacità così evidentemente avanzate come il ragionamento, la risoluzione di problemi e il linguaggio. Una indiscussa assunzione di fondo della ricerca sull'IA deve comunque essere che lo scopo dell'intelligenza è di arricchire le nostre interazioni con il mondo esterno e aumentarne il controllo.

Una intelligenza priva di un corpo, per quanto diligente nel risolvere problemi di matematica, non potrebbe realizzare questo fine se non fosse in grado di percepire il mondo o di agire in esso. La robotica, lo studio del modo di unire percezione e azione, è dunque una aggiunta cruciale all'IA....

Sarebbe certo interessante riuscire a proporre una definizione di intelligenza che enfatizzi l'aspetto dell'apprendimento. Considerate un sistema artificiale come un robot o il computer che lo controlla: il sistema ci sembrerà intelligente se sarà capace di imparare dall'esplorazione dell'ambiente, un po' come un bambino».

Quindi, in questo ultimo scorcio di millennio, a distanza di quarant'anni dalla nascita dei primi robot industriali, assistiamo a un generale ripensamento dei percorsi lungo i quali la robotica dovrà evolversi.

L'emulazione dell'intelligenza naturale e dei comportamenti intelligenti sembra voler seguire strade diverse e variegate. Le attuali certezze e speranze sono contrassegnate dalle tappe raggiunte, ma anche dai cammini finiti in vicoli ciechi.

Con la nascita della «Vita Artificiale», la possibilità della robotica di entrare tra le categorie dei modelli di «vita artificiale» è molto attuale. Tuttavia, mentre altri modelli di vita artificiale legati alla farmacologia e alle biotecnologie sembrano non avere problemi di supporto economico, l'evoluzione dei robot mobili intelligenti dipenderà fortemente dalla capacità dei ricercatori di evocare suggestioni e proporre applicazioni interessanti per i gestori dei finanziamenti.

Altrimenti, lo studio dei comportamenti intelligenti invece di avvenire attraverso la loro sintesi, ovvero la loro progettazione e costruzione, continuerà sulla classica strada dell'analisi delle reali forme di vita biologiche, con i tempi propri delle scienze naturali.

VINCENZO TAGLIASCO *è direttore del Dipartimento informatico, sistemistico, telematico della Facoltà di ingegneria dell'Università di Genova.*

Calcolatori, reti e lavoro

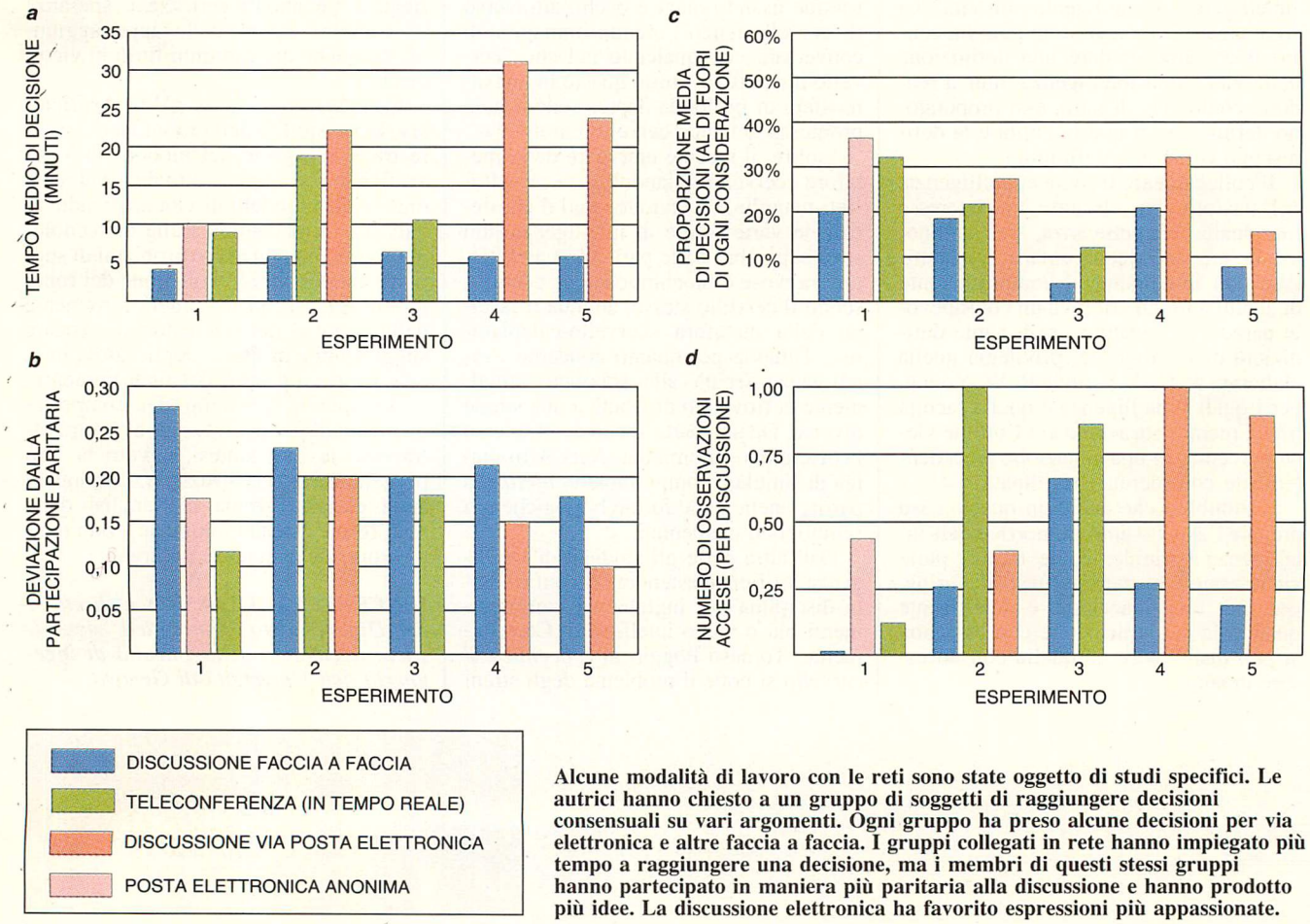
di Lee Sproull
e Sara Kiesler

L'informatizzazione sembra destinata a rendere più dinamico e flessibile lo svolgimento delle diverse attività lavorative

Per quanto il mondo stia trasformandosi in un villaggio globale, sul posto di lavoro la maggior parte delle persone conduce ancora una attività molto circoscritta, trascorrendo gran parte del proprio tempo in un'unica localizzazione fisica e parlando soprattutto con colleghi o clienti. All'interno di un'azienda le persone appartengono a pochi gruppi: il gruppo di lavoro principale, un comitato o un gruppo costituito *ad hoc* e, magari, un gruppo sociale di tipo informale.

Alcuni, tuttavia, già conducono un'esistenza più cosmopolita perché lavorano in organizzazioni che si avvalgono di estese reti informatiche. Questi individui possono comunicare con altri sparsi per il mondo con la stessa facilità con cui possono mantenere contatti con gli occupanti dell'ufficio attiguo. Possono lanciarsi in infervorate discussioni di gruppo sulla politica aziendale, sulla nuova progettazione dei prodotti, sui piani di acquisto oppure sulla partita della sera precedente, e tutto senza mai incontrarsi di persona.

La struttura del lavoro di un'organizzazione collegata a una rete è diversa da quella convenzionale, tanto in termini di tempo quanto di spazio. La comunicazione basata su calcolatore risulta estremamente veloce rispetto ai servizi tele-



Alcune modalità di lavoro con le reti sono state oggetto di studi specifici. Le autrici hanno chiesto a un gruppo di soggetti di raggiungere decisioni consensuali su vari argomenti. Ogni gruppo ha preso alcune decisioni per via elettronica e altre faccia a faccia. I gruppi collegati in rete hanno impiegato più tempo a raggiungere una decisione, ma i membri di questi stessi gruppi hanno partecipato in maniera più paritaria alla discussione e hanno prodotto più idee. La discussione elettronica ha favorito espressioni più appassionate.

fonici o postali, bollati come «*snail mail*» (posta lumaca) da chi già si è convertito alla posta elettronica. Per inviare un messaggio all'altro capo del globo sono sufficienti pochi minuti e ogni messaggio può essere indirizzato a una o più persone. Le reti poi possono anche arrivare, in un certo senso, ad arrestare il tempo: i messaggi elettronici possono infatti venire conservati indefinitamente nella memoria di un calcolatore. Gli utenti possono leggere o rileggere i messaggi ricevuti in qualsiasi momento, copiarli, modificarli o inviarli.

I dirigenti d'azienda sono spesso attratti dalle reti perché queste promettono comunicazioni più veloci e una maggiore efficienza. A nostro parere il vero potenziale della comunicazione in rete non riguarda tanto questi vantaggi, quanto piuttosto la possibilità di influenzare l'ambiente di lavoro nel suo complesso e le capacità dei dipendenti. Le reti possono essere impiegate per promuovere nuovi schemi di svolgimento dei compiti e per definire nuove strutture gerarchiche; esse possono infatti essere facilmente sfruttate per modificare i modelli convenzionali che determinano i soggetti ammessi a entrare in contatto con i gradi superiori e a prendere conoscenza di determinate informazioni.

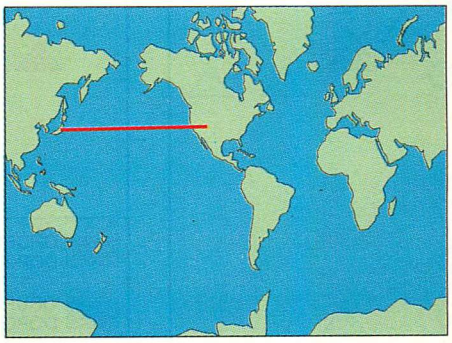
Le possibilità offerte dalle reti fanno sorgere domande importanti per i dirigenti e i sociologi che si interessano di organizzazione aziendale. I dipendenti possono veramente collaborare quando il loro unico contatto è attraverso un calcolatore? Se interagiscono attraverso posta elettronica, teleconferenze e discussioni elettroniche di gruppo, che cosa tiene insieme l'organizzazione? Le reti consentono un accesso pressoché illimitato ai dati e ad altri utenti: dove converrà tracciare la linea che limita la libertà di accesso? Come sarà l'organizzazione del futuro?

Noi e un gruppo di colleghi stiamo cercando di capire in che modo le reti informatiche possano influenzare la natura del lavoro e delle relazioni tra dirigenti e subordinati. Le nostre scoperte sono volte ad aiutare la gente a sfruttare al meglio le opportunità offerte dalle reti ed evitare, o almeno mitigare, le potenziali insidie presenti nelle organizzazioni collegate in rete.

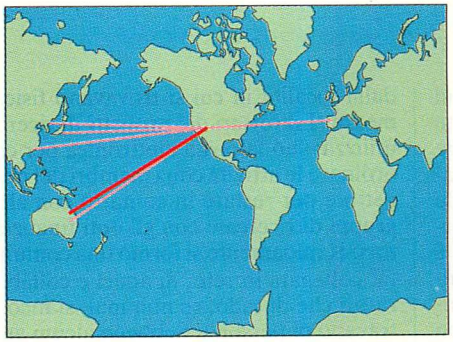
La nostra ricerca è fondata su due tipi di approccio. Alcune questioni possono essere studiate attraverso esperimenti di laboratorio. Per esempio, quali saranno le risposte emotive di piccoli gruppi a diverse forme di comunicazione? Altre questioni, in particolare quelle legate alla trasformazione delle organizzazioni, richiedono studi sul campo, in aziende reali che impieghino ormai correntemente le reti informatiche. Dati che descrivano come centinaia di migliaia di lavoratori attualmente impieghino le comunicazioni in rete possono aiutare a prevedere come altre persone lavoreranno in futuro, quando le comunicazioni informatiche diverranno più comuni.

Come si lavora con la posta elettronica

Le reti e la posta elettronica rendono possibile la comunicazione globale, come è illustrato dal comportamento di «Sue Jones», un personaggio ipotetico creato dalle autrici in base a uno studio compiuto su un certo numero di impiegati. In una tipica giornata lavorativa Sue invia e riceve da 25 a 100 messaggi riguardanti argomenti sia di lavoro sia personali. Le cartine indicano i collegamenti stabiliti nel corso della giornata, evidenziando quelli occorsi all'interno di uno dei gruppi cui Sue appartiene; gli schermi mostrano i messaggi che Sue riceve e invia ai membri del gruppo. In questo caso un potenziale momento di crisi relativo alla decisione sul prezzo di un nuovo prodotto viene rapidamente affrontato e risolto grazie alla posta elettronica. Le reti permettono una stretta, continua cooperazione tra colleghi fisicamente assai distanti.



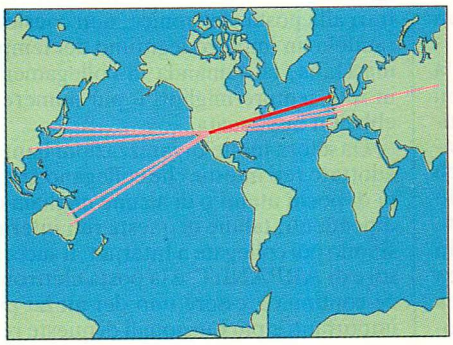
Ora: 7:55
A: Gruppo sviluppo prodotti
Da: Ising
Oggetto: Risultati marketing
Salve a tutti, qui a Tokyo il tempo è splendido. Il documento completo arriverà nel pomeriggio per posta elettronica, ma sembra che la concorrenza intenda lanciare il prodotto a un prezzo molto più basso di quanto ci aspettassimo.
Lee



Ora: 9:10
A: Gruppo sviluppo prodotti
Da: jwp/AP Supplies
Oggetto: Risultati marketing

A Singapore possiamo fornirvi una confezione bella e molto più economica.

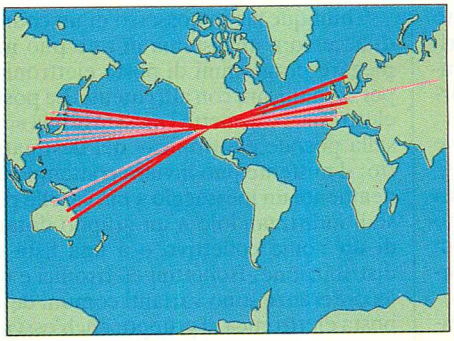
John



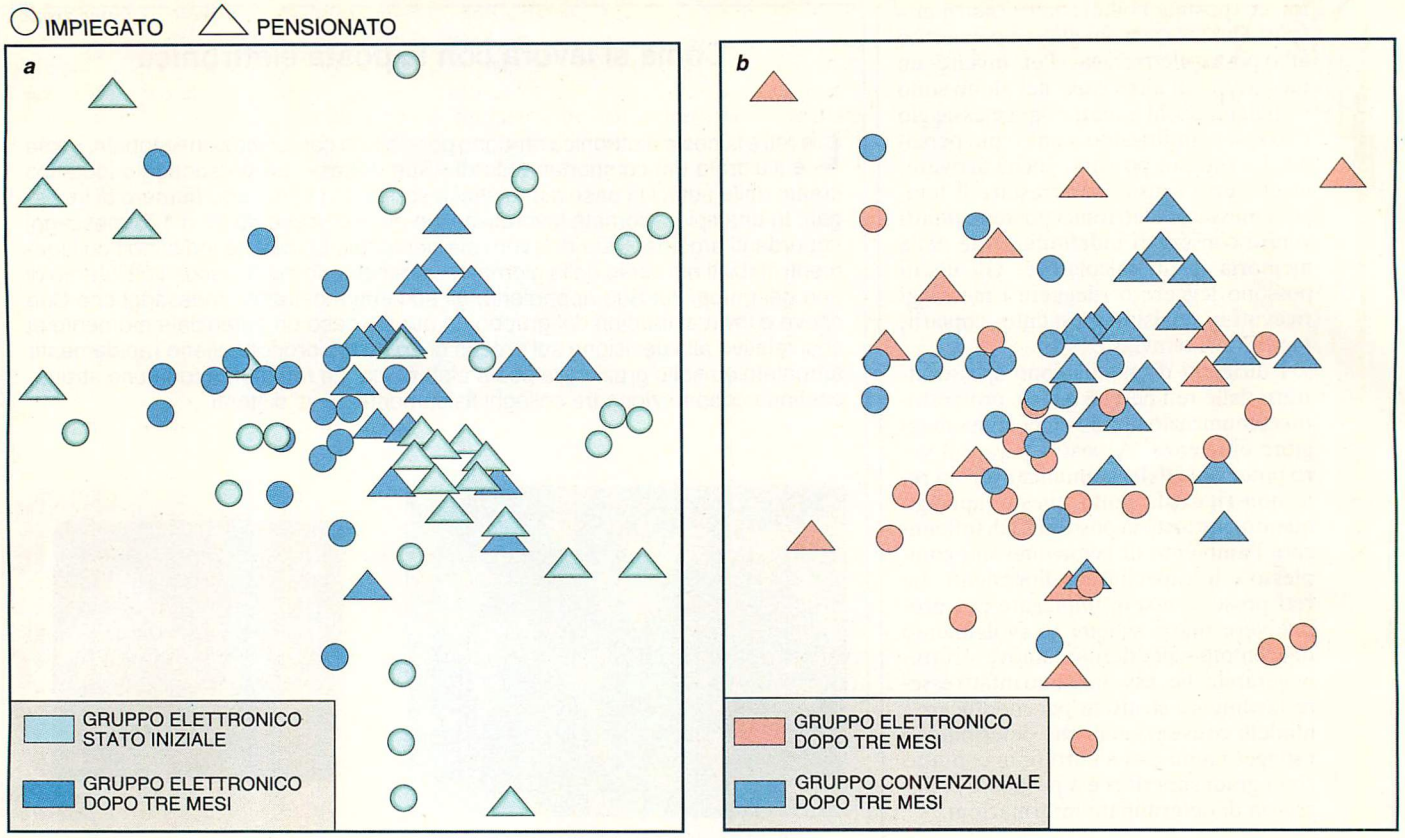
Ora: 10:05
A: Gruppo sviluppo prodotti
Da: «Pete Wilson»
Oggetto: Risultati marketing

John,
Grazie per il suggerimento, ma non posso permettermi ritardi sul programma di lancio.

--Pete Wilson



Ora: 11:00
A: Gruppo sviluppo prodotti
Da: «Sue»
Oggetto: Non ci sono problemi
Ehi gruppo, ho controllato. Possiamo usare un'idea di John per una confezione più economica. Ed è anche biodegradabile, ottimo per la pubblicità.
I rischi per il programma sono minimi.
Sue



Basandosi su studi ed esperimenti sul campo i sociologi possono gradualmente costruire un corpo di dati per dimostrare come il lavoro e le aziende vengano trasformati via via che la tecnologia delle reti si diffonde. Sebbene questo processo possa apparire diretto, in realtà è spesso pieno di svolte impreviste: la gente impiega la tecnologia in modi sorprendenti e spesso gli effetti che ne risultano contraddicono tanto le previsioni teoriche quanto le aspettative dei dirigenti aziendali.

Una grossa sorpresa emerse con la messa in opera, sul finire degli anni sessanta, della prima rete informatica su grande scala, ARPANET, che venne sviluppata per l'Advanced Research Projects Agency (ARPA), sezione dello US Department of Defense; questa rete avrebbe dovuto consentire di mettere in comunicazione esperti di informatica delle università e di altri istituti di ricerca con calcolatori distanti, permettendo così un efficace accesso a macchine non disponibili in loco. Un servizio chiamato posta elettronica, che consentiva ai ricercatori di comunicare tra loro, era considerato una funzione di minore importanza aggiunta alla rete.

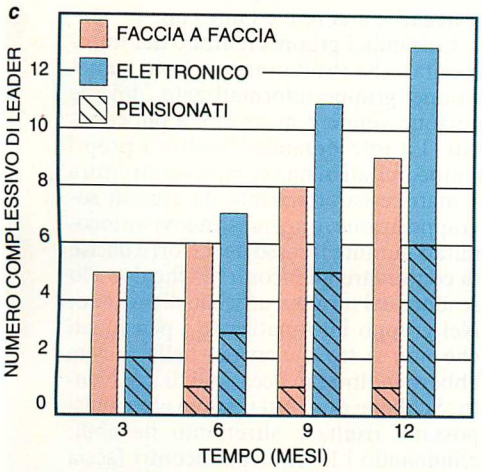
Tuttavia la posta elettronica divenne rapidamente una delle funzioni di maggiore successo di ARPANET. Esperti in informatica di tutto il paese impiegavano ARPANET per scambiarsi opinioni in maniera spontanea e casuale. Gli studenti discutevano problemi e condividevano le proprie conoscenze con professori e altri studenti, indipendentemente dalla località in cui si trovavano fisicamente. I direttori dei progetti di ricerca utilizzavano la posta elettronica per coordinare le attività con i membri del progetto e per restare in contatto con altri gruppi di ricerca e con gli enti finanziatori. Rapidamente si formò una comunità, collegata in rete, di amici e collaboratori che di rado, se non mai, si incontravano di persona. Sebbene alcuni amministratori di rete si mostrassero contrari alla posta elettronica, non considerandola un impiego legittimo del tempo macchina, la domanda di collegamenti in rete sempre migliori e più numerosi ebbe un'impennata.

Da allora molte organizzazioni hanno adottato reti interne che collegano gruppi di pochi utenti o di alcune migliaia di dipendenti; talune di queste reti interne si sono poi collegate a Internet, il successore di ARPANET, e la posta elettronica continua a essere uno dei mezzi più importanti e più funzionali di queste reti informatiche.

Chiunque sia in possesso di un codice di accesso a un sistema in rete può impiegare programmi di posta elettronica per comunicare con altri utenti. La posta elettronica trasmette i messaggi alla «casella postale elettronica» del destinatario: il mittente può inviare contemporaneamente un messaggio a più caselle postali indirizzandolo a un gruppo dotato di un nome collettivo o a una lista di distribuzione. Bollettini elettronici e teleconferenze sono varianti comuni della posta elettronica di gruppo: anch'essi infatti prevedono dei nomi per identificare rispettivamente argomento e utenza. I bollettini elettronici mostrano i messaggi in ordine cronologico, ovvero nell'ordine in cui vengono ricevuti, mentre le teleconferenze ordinano i messaggi in base all'argomento e visualizzano i messaggi così raggruppati.

Nella maggior parte delle organizzazioni oggi collegate in rete la tecnologia delle comunicazioni informatiche è abbastanza simile; tuttavia al momento dell'impiego esistono differenze rilevanti nell'effettivo comportamento degli utenti che derivano da scelte di politica aziendale. In alcune organizzazioni l'accesso alla posta elettronica è semplice e aperto: la maggior parte dei dipendenti ha a disposizione sulla propria scrivania terminali o calcolatori collegati in rete e chiunque può inviare messaggi a chiunque altro. I costi derivati dall'impiego della posta elettronica sono considerati parte integrante delle spese di struttura generali e non vengono addebitati ai dipendenti o ai dipartimenti presso i quali sono impiegati. Nelle organizzazioni da noi studiate dove vige una rete aperta, i dipendenti in genere inviano e ricevono tra i 25 e i 100 messaggi al giorno e appartengono a un numero di gruppi elettronici variabile da 10 a 50. Le variazioni in queste cifre dipendono dalle mansioni, dalle posizioni gerarchiche, dall'età e anche dal livello di esperienza di chi impiega il calcolatore.

In altre organizzazioni collegate in rete i responsabili hanno scelto di limitare l'accesso o di addebitare i costi direttamente agli utenti, riducendo così la fre-



Se le persone conversano per via elettronica emergono strutture di gruppo dinamiche. I grafici mostrano il comportamento di due gruppi, in ciascuno dei quali erano presenti sia lavoratori dipendenti sia pensionati. Un gruppo lavorava «faccia a faccia», l'altro via rete. I membri con maggiori informazioni e contatti sociali sono vicini al centro dei diagrammi, quelli con meno sono presentati sui bordi. Con il tempo il gruppo elettronico diventa socialmente più compatto (*a*). I pensionati in particolare diventano più integrati socialmente nel gruppo elettronico rispetto a quello convenzionale (*b*). Le reti incoraggiano inoltre più persone ad assumere posizioni predominanti (*c*).

quenza di impiego. Paul Schreiber, articolista di «Newsday», spiega come la propria organizzazione sia passata da una rete ad accesso aperto a una ad accesso limitato. Sembra infatti che i dirigenti reputassero eccessivo il tempo che i cronisti del giornale dedicavano a spedire messaggi elettronici; da queste considerazioni furono indotti a modificare il programma per l'invio della posta elettronica di modo che i cronisti potessero ancora ricevere messaggi ma non spedirne. I redattori, per parte loro, potevano continuare a inviare posta elettronica a chiunque. Chiaramente non sempre è la tecnologia di per sé a imporre le trasformazioni: le scelte e la politica aziendale hanno un peso altrettanto rilevante.

Tuttavia, anche in organizzazioni dove l'accesso è aperto, fare previsioni sull'effetto che le reti produrranno sulle comunicazioni si è dimostrato un compito tutt'altro che facile. Alcuni dei primi ricercatori che si sono occupati sistematicamente delle reti informatiche reputavano che questa tecnologia avrebbe reso più semplice prendere decisioni rispetto alla discussione faccia a faccia, dato che i messaggi su calcolatore non erano che testo. A loro avviso la discussione elettronica avrebbe dovuto risultare puramente intellettuale e di conseguenza al momento di prendere delle decisioni le doti diplomatiche e le idiosincrasie personali avrebbero avuto un ruolo minore.

Ulteriori ricerche hanno però rivelato un quadro più complesso. In un'interazione elettronica gli indizi sociali e contestuali che in genere regolano e influenzano le dinamiche di gruppo mancano o sono comunque attenuati. Nei messaggi elettronici non appaiono informazioni relative a titoli, importanza sociale, posizione gerarchica, razza, età e aspetto di chi scrive; anche il contesto non è definito con chiarezza, dato che comunicazioni formali e informali hanno sostanzialmente lo stesso aspetto. Le persone possono disporre di una quantità di informazioni esterne su mittenti, destinatari e situazioni, tuttavia l'interazione via calcolatore vera e propria contiene pochi indizi che rammentino loro queste informazioni.

In una serie di esperimenti condotti presso la Carnegie Mellon University abbiamo confrontato i modi in cui piccoli gruppi prendono le proprie decisioni impiegando rispettivamente teleconferenze, posta elettronica e discussioni faccia a faccia.

L'impiego di una rete spingeva i partecipanti a esprimersi in maniera più franca ed equanime. La maggior parte della discussione non era una prerogativa pressoché esclusiva di una o due persone, come avviene in molte riunioni faccia a faccia, e gli interventi risultavano quasi equamente proporzionati tra i partecipanti; i gruppi collegati in rete, inoltre, generavano un maggior numero di proposte di azione rispetto alle riunioni tradizionali.

La discussione libera e aperta presenta tuttavia un inconveniente. Nei nostri esperimenti la maggiore democrazia garantita dalle interazioni elettroniche ha interferito con il conseguimento delle decisioni. Abbiamo osservato che prendere una decisione per via elettronica richiedeva a gruppi di tre persone un tempo circa quattro volte superiore a quello necessario per prendere una decisione faccia a faccia. In un caso un gruppo non è addirittura riuscito a raggiungere un accordo e alla fine siamo stati costretti a porre fine all'esperimento. L'impossibilità per i partecipanti di interrompersi reciprocamente ne rallentava le decisioni e aumentava la conflittualità, dato che alcuni cercavano di guadagnare il controllo della rete. Abbiamo inoltre notato che le persone tendevano a esprimere opinioni estreme e a dar sfogo all'ira più apertamente in ambiente elettronico rispetto a quando erano sedute vicine a chiacchierare. Gli esperti in informatica che impiegano ARPANET parlano a questo proposito di maggiore facilità degli utenti ad appassionarsi.

Si è scoperto che la comunicazione elettronica può influenzare gli effetti dello status sociale. Le singole condizioni sociali o professionali in genere rappresentano un efficace regolatore dell'interazione di gruppo. I membri di un gruppo in genere si dimostrano deferenti nei confronti di coloro che hanno uno status più alto e tendono a seguirne le direttive; il linguaggio dei membri del gruppo e il loro comportamento diventano più formali in presenza di persone con status superiore. Gli individui con status più alto, a loro volta, parlano più spesso e influenzano la discussione del gruppo maggiormente rispetto a quelli con status inferiore.

Dato che le conversazioni elettroniche attenuano gli indizi contestuali, ci aspettavamo che anche l'effetto delle differenze di status all'interno del gruppo diminuisse. In un recente esperimento condotto con Vitaly Dubrovsky della Clarkson University e Beheruz Sethna della Lamar University abbiamo chiesto a gruppi che contenevano membri con status elevato e basso di prendere decisioni sia via posta elettronica sia faccia a faccia. I risultati hanno confermato che la quantità di discorsi e l'influenza delle persone con status più elevato diminuivano quando i membri del gruppo comunicavano elettronicamente.

Si può giudicare positivo questo stato di cose? Quando i membri con status più elevato hanno poca competenza, una maggiore democrazia potrebbe migliorare le decisioni prese. Se invece i membri con status più elevato sono meglio qualificati per prendere decisioni, i risultati delle decisioni prese con un più largo consenso possono essere meno buoni.

Shoshanah Zuboff della Harvard Business School ha documentato gli effetti della minore importanza dello status in un sistema di teleconferenza in un'azienda. Le persone che si consideravano poco attraenti ammettevano di sentirsi più sicure di sé esprimendosi via rete. Altri, di bassa statura o con voce poco decisa, non dovevano più faticare per essere presi sul serio durante gli incontri.

I ricercatori hanno avanzato ipotesi alternative per spiegare l'apertura e la democrazia del colloquio elettronico. Secondo una di queste, le persone che impiegano volentieri i calcolatori sarebbero infantili o indisciplinate; tale ipotesi non spiega però i risultati sperimentali che dimostrano che le stesse persone parlano più liberamente attraverso un calcolatore di quanto farebbero faccia a faccia con l'interlocutore. Secondo un'altra ipotesi i messaggi testuali richiederebbero un linguaggio più forte per essere accettati; ciò tuttavia spiegherebbe la facilità dell'utente ad appassionarsi, ma non la riduzione delle differenze sociali e di status. La spiegazione forse più convincente del comportamento dei lavoratori collegati in rete ipotizza che, in assenza o quasi di indizi relativi al contesto sociale, gli individui ignorino la propria situazione sociale e smettano di preoccuparsi di come gli altri li valuteranno. Di conseguenza perdono meno tempo a studiare gli atteggiamenti da assumere e si preoccupano meno di apparire socialmente graditi, risultando quindi più spontanei nella comunicazione.

La diminuzione degli atteggiamenti sociali è stata dimostrata in studi specifici in cui i ricercatori invitavano le persone a descrivere il proprio comportamento. In uno degli esperimenti si

chiedeva di completare un questionario di autovalutazione con carta e penna o per via elettronica. Le persone scelte a caso per rispondere in forma elettronica hanno riportato comportamenti sociali sensibilmente meno accettabili, per esempio l'assunzione di droghe o piccoli crimini. John Greist e i suoi colleghi dell'Università del Wisconsin hanno riscontrato un analogo calo di inibizione nelle dichiarazioni ponendo domande di anamnesi a pazienti clinici. Le persone che rispondevano a un'intervista medica per via elettronica erano disposte a rivelare un maggior numero di comportamenti socialmente e fisicamente indesiderabili rispetto a coloro che rispondevano alle stesse domande poste da un medico.

Questi studi dimostrano quindi che le persone sono disposte a rivelare molti più sintomi e comportamenti indesiderabili a una macchina. Ma sono attendibili le loro confessioni? Un'analisi sul consumo di alcolici condotta da Jennifer J. Waterton e John C. Duffy dell'Università di Edimburgo sembra suggerire una risposta affermativa. Nelle inchieste tradizionali, gli intervistati ammettono di bere soltanto una quantità corrispondente a circa la metà di quanto le vendite effettive di bevande alcoliche lascerebbero supporre. Le persone casualmente scelte per rispondere attraverso il calcolatore hanno ammesso consumi di alcool superiori rispetto a quelle che hanno parlato con un intervistatore e i volumi di consumo confessati al calcolatore si mostrano più rispondenti alle vendite reali di alcolici.

Questi e altri studi controllati sulla comunicazione elettronica sembrano suggerire come, pur trattandosi di una comunicazione relativamente impersonale, essa, paradossalmente, sia in grado di far sentire gli intervistati più a proprio agio. La gente risulta meno timida e più disposta a scherzare nelle discussioni elettroniche, esprime più opinioni, più idee e manifesta più facilmente anche le proprie emozioni.

A causa di questi effetti comportamentali le organizzazioni stanno scoprendo applicazioni per attività che nessuno aveva preventivato. I calcolatori possono essere molto utili per consulti e per condurre inchieste su argomenti delicati, situazioni in cui molte persone diventano ansiose e nascondono le proprie emozioni e opinioni.

Proprio come le dinamiche delle comunicazioni elettroniche sono diverse da quelle che agiscono durante i colloqui o nei rapporti epistolari, così i gruppi elettronici non sono solo gruppi tradizionali i cui membri impiegano un calcolatore. Le persone che lavorano in organizzazioni che dispongono di una rete probabilmente fanno parte di gruppi elettronici distribuiti tra diversi fusi orari e varie categorie di lavoro. Alcuni di questi gruppi costituiscono estensioni dei reali gruppi di lavoro e forniscono un comodo sistema che consente ai loro membri di comunicare tra un incontro faccia a faccia e l'altro. Altri gruppi elettronici consentono rapporti fra persone che non si conoscono *de visu* e che forse non avranno mai occasione di incontrarsi.

La Hewlett-Packard, per esempio, impiega esperti in ergonomia e di organizzazione aziendale che lavorano in località sparse in tutto il mondo e raramente si incontrano di persona, anche solo una volta all'anno. Una teleconferenza crea per loro continue occasioni di incontro in cui possono discutere frequentemente e con continuità questioni professionali e aziendali.

Sotto certi aspetti i gruppi elettronici assomigliano ai normali gruppi sociali: sostengono interazioni prolungate, sviluppano proprie norme di comportamento e generano competizione. I gruppi elettronici, che contano spesso più di 100 membri, generano però relazioni tra individui che non si conoscono personalmente.

I dipendenti le cui organizzazioni sono collegate con Internet o con un'altra rete commerciale possono appartenere a gruppi elettronici i cui membri provengono da molte organizzazioni diverse. Per esempio, Brian K. Reid della Digital Equipment Corporation afferma che circa 37 000 organizzazioni sono collegate a USENET, una rete organizzata con una certa libertà che collega più di 1500 gruppi di discussione chiamati *newsgroup*. Secondo Reid 1,4 milioni di persone in tutto il mondo seguono almeno un *newsgroup*.

La comunicazione in rete comincia solo oggi ad avere influenza sulla struttura del posto di lavoro. La forma della maggior parte delle organizzazioni attuali è stata dettata dai limiti del mondo non-elettronico. I lavori interdipendenti richiedono una vicinanza fisica. Strutture gerarchiche formali decidono chi deve riferire a chi, chi deve assegnare i compiti e chi può avere accesso alle informazioni. Questi limiti rafforzano la centralizzazione dell'autorità e definiscono il grado di condivisione delle informazioni, il numero di livelli all'interno dell'organizzazione, la quantità di collegamenti trasversali e la struttura delle relazioni sociali.

Le organizzazioni che impiegano le reti informatiche potrebbero assumere una struttura più flessibile e meno gerarchica. Un esperimento sul campo condotto da Tora K. Bikson della Rand Corporation e John D. Eveland dei Claremont Colleges conferma questa ipotesi. I due studiosi hanno costituito due gruppi operativi in una grande azienda di servizi. Ognuno di questi gruppi era stato incaricato di analizzare questioni relative al pensionamento dei dipendenti; entrambi erano composti da 40 membri: metà aveva lasciato da poco l'azienda per raggiunti limiti di età, l'altra metà lavorava ancora ma avrebbe potuto andare in pensione. L'unica differenza tra i due gruppi era data dal fatto che uno di essi aveva a disposizione calcolatori collegati a una rete e l'altro no.

Entrambi i gruppi crearono dei sottocomitati che risultarono però più numerosi nel gruppo informatizzato, dove le persone vennero assegnate a più comitati. La rete organizzò inoltre i propri sottocomitati in una complessa struttura a matrice caratterizzata da aree di sovrapposizione, e aggiunse nuovi sottocomitati durante il corso dei lavori e decise di continuare gli incontri anche dopo lo scadere del termine ufficiale di un anno. Nel gruppo informatizzato i pensionati che non si trovavano più nella società ebbero inoltre più occasioni di intervento. Sebbene non tutti i gruppi elettronici possano risultare altrettanto flessibili, eliminando i limiti degli incontri faccia a faccia evidentemente si facilita la ricerca di diverse forme di organizzazione di gruppo.

Le reti possono anche modificare i modelli di condivisione delle informazioni nelle aziende. Le organizzazioni convenzionali hanno sistemi formali di archiviazione e di distribuzione delle responsabilità per ciò che riguarda la diffusione delle informazioni. Gran parte delle informazioni di un'organizzazione si basa su esperienze personali che non appaiono nelle informazioni distribuite formalmente: le storie di guerra dei reduci (che i manuali militari non contemplano), i racconti «di folklore» su come funzionano veramente le apparecchiature sperimentali (che nelle riviste specializzate non appaiono) o le regole non scritte sul comportamento dei lavoratori (che vengono passate di bocca in bocca e non compaiono mai nei contratti e nei regolamenti interni di un'azienda).

In passato la diffusione di queste informazioni era dovuta soprattutto alla prossimità fisica dei lavoratori e alla loro conoscenza reciproca e, di conseguenza, i dipendenti lontani o mal collegati non potevano attingere a questa esperienza comune. Questa conoscenza non scritta potrebbe rappresentare un'importante fonte di informazioni nelle grandi organizzazioni; i gruppi elettronici forniscono un ambito in cui condividere queste esperienze indipendentemente da limiti spaziali e sociali.

Un tipo importante di flusso di informazioni inizia con le parole «Qualcuno sa...?» che appaiono spesso sulle reti informatiche. Il mittente può inviare la propria richiesta di informazioni a un'intera organizzazione, a una particolare lista di distribuzione o a un bollettino elettronico, e chiunque legga il messaggio può rispondere. Abbiamo studiato le richieste di informazioni che compaiono sulla rete della Tandem Computers di Cupertino in California, una società informatica che impiega 10 500 persone in tutto il mondo. In uno studio, condotto con David Constant, abbiamo trovato una media di sei messaggi del tipo «Qualcuno sa...» trasmessi ogni giorno a liste di distribuzione che abbracciano più o meno tutta l'azienda.

Le richieste di informazioni di solito provengono da tecnici del settore o da

venditori che chiedono se qualcuno abbia esperienze personali o conoscenze tecniche che non riescono a rintracciare nei documenti formali disponibili nel proprio posto di lavoro. Alla Tandem circa otto dipendenti rispondono mediamente a una domanda presentata via posta elettronica; meno del 15 per cento di queste persone conosce personalmente chi ha posto la domanda o si trova anche soltanto nella sua stessa città.

Coloro che inviano le domande possono ridistribuire elettronicamente le risposte ricevute inserendole in un archivio pubblico sulla rete. Alla Tandem in circa metà dei casi gli archivi di risposta vengono resi disponibili attraverso la rete aziendale così che anche gli altri dipendenti possano leggerli, e questo processo di condivisione viene ulteriormente sfruttato dall'azienda conservando un archivio elettronico di domande e risposte, anch'esso accessibile attraverso la rete aziendale. La società ha così creato un «magazzino» di informazioni e di esperienze lavorative a cui è sempre possibile accedere nel tempo e nello spazio (le informazioni restano, per esempio, sempre disponibili anche quando un dipendente non è al suo posto di lavoro oppure ha lasciato la società). Uno studio condotto da Thomas Finholt nell'ambito del nostro programma di ricerca ha rivelato che i dipendenti accedono a questo archivio più di 1000 volte al mese, soprattutto quelli che si trovano geograficamente lontani dalla sede centrale dell'azienda.

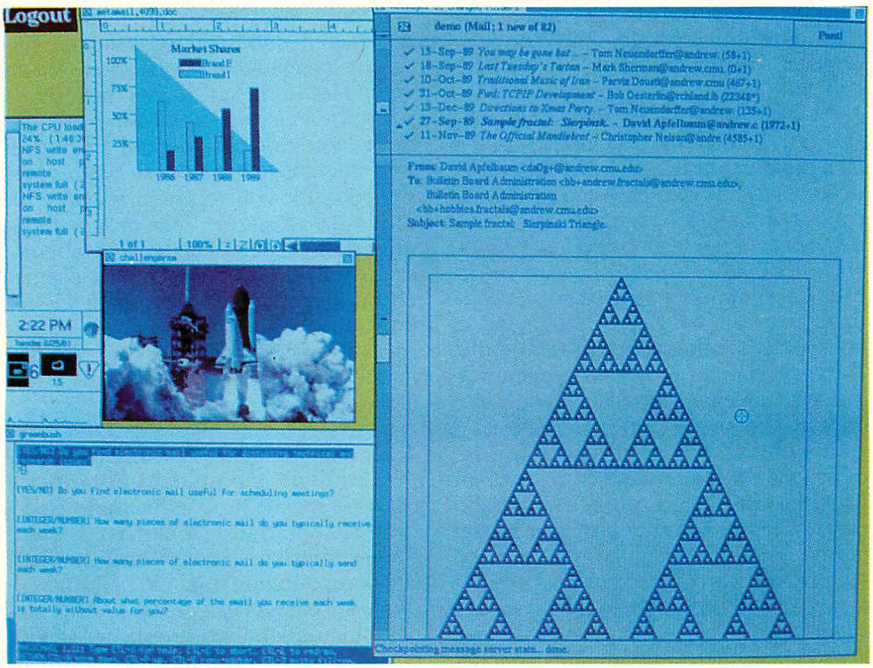
La condivisione di informazioni su base discrezionale che abbiamo riscontrato alla Tandem e presso altre organizzazioni collegate in rete sembra funzionare, contrariamente a quanto avviene nelle organizzazioni non elettroniche. Chi invia le domande ammette apertamente la propria ignoranza a qualcosa come centinaia o anche migliaia di persone e chi risponde a queste richieste di aiuto di sconosciuti lo fa senza la speranza di trarne personalmente alcun beneficio diretto.

Ci si potrebbe chiedere perché la gente risponda tanto prontamente a richieste di informazioni provenienti da sconosciuti. Parte della spiegazione risiede nel fatto che per rispondere a un messaggio in rete occorrono una fatica minima e pochissimo tempo; le reti ad accesso aperto, inoltre, favoriscono il libero flusso delle informazioni. Chi risponde sembra convinto che condividere le informazioni migliori la comunicazione elettronica nel suo complesso e produca un ambiente più ricco. La rete produce quindi una sorta di altruismo elettronico che contraddice chi indica le reti come responsabili di un indebolimento del tessuto sociale delle organizzazioni.

I cambiamenti nelle comunicazioni resi possibili dalle reti possono modificare sostanzialmente la relazione tra un dipendente e la sua organizzazione, la struttura delle organizzazioni e la natura della gestione. I dirigenti e i professionisti di maggior spicco in genere possiedono efficienti relazioni sociali e informative all'interno delle proprie organizzazioni e delle rispettive comunità professionali. Viceversa, coloro che per fattori geografici, necessità di lavoro o ragioni personali lavorano alla periferia di un'organizzazione hanno relativamente poche occasioni di contatto con gli altri.

La riduzione degli ostacoli alla comunicazione imposti dalla distanza sia fisica sia sociale probabilmente si ripercuoterà soprattutto su chi svolge mansioni periferiche rispetto ai dipendenti che occupano posizioni più centrali. Insieme a Charles Huff del St. Olaf College abbiamo studiato questa possibilità per gli impiegati comunali della città di Fort Collins nel Colorado. I lavoratori che ricorrevano diffusamente alla posta elettronica sostenevano di impegnarsi maggiormente nel proprio lavoro e nei confronti dei colleghi rispetto a chi impiegava la rete solo sporadicamente. Questa correlazione si è dimostrata particolarmente marcata per i lavoratori che

I collegamenti elettronici favoriscono soprattutto coloro che si trovano in posizioni periferiche. Il personale della Tandem Computers, Inc., la cui sede centrale è a Cupertino, in California, ha accesso ai dati attraverso una rete. I cerchi indicano quante volte in un anno ciascun ufficio ha scelto di accedere a un archivio con domande e risposte dei dipendenti relative a prodotti e servizi offerti dall'azienda; la dimensione dei cerchi è proporzionale al numero di accessi all'archivio. Chi lavora in uffici decentrati, dove l'esperienza locale è relativamente limitata, fa maggior uso delle informazioni disponibili attraverso la rete.



La posta elettronica avanzata, come quella sperimentale disponibile alla Bellcore, consentirà di trasmettere immagini, animazioni, programmi completi per calcolatori e registrazioni sonore. Queste funzioni allargheranno le applicazioni delle comunicazioni in rete e, a differenza della posta elettronica odierna, potrebbero fornire indizi rivelatori dello status sociale degli utenti, con ulteriori conseguenze sul comportamento.

svolgevano turni, i quali, data la natura del loro lavoro, avevano meno occasioni di vedere i propri colleghi rispetto agli altri. Come ci ha raccontato un poliziotto: «Lavorando al turno di notte finivo sempre per sapere delle promozioni quando queste erano ormai avvenute, anche se avrei avuto diritto a prendere parte alla discussione. Ora invece posso dire la mia prima che le decisioni vengano prese.»

Le organizzazioni sono tradizionalmente costruite su due concetti chiave: la suddivisione gerarchica degli obiettivi e dei compiti e la stabilità nel tempo delle relazioni tra i dipendenti; nelle organizzazioni completamente informatizzate (che verosimilmente col tempo diverranno sempre più comuni) le strutture dei compiti possono tuttavia diventare molto più flessibili e dinamiche. La gerarchia non scomparirà ma verrà affiancata da reticoli distribuiti di interconnessioni.

In genere, nelle organizzazioni di oggi i dirigenti conoscono le persone che sono alle loro dipendenze e si servono di chi conoscono. In futuro, peraltro, i dirigenti di alcuni gruppi di progettazione elettronica si troveranno ad affrontare la sfida di lavorare con persone che non hanno mai incontrato. Stabilire le risorse per i progetti e dar credito o biasimo in base ai risultati ottenuti diverrà più complicato: un individuo potrà sovente far parte di molti gruppi diversi e sarà in grado di sfruttare la rete per acquisire risorse senza alcun intervento o, forse, addirittura all'insaputa di chi dirige il lavoro.

Un recente caso sorto nell'ambito di una ricerca matematica ci offre un indizio della natura di ciò che forse ci aspetta. I matematici della Bell Communications Research (Bellcore) e della Digital Equipment cercavano di scomporre in fattori un grande numero teoricamente interessante, noto come nono numero di Fermat. Diffusero così un messaggio via Internet per arruolare ricercatori di università, laboratori statali e aziende che li aiutassero nel progetto. Le varie centinaia di ricercatori offertisi come volontari ricevettero (via posta elettronica) software e una parte di problema da risolvere e, a loro volta, restituirono la soluzione trovata con lo stesso mezzo.

Una volta combinati i risultati parziali ottenuti da tutti i volontari, il messaggio su Internet che annunciava il buon esito del progetto conteneva la seguente ammissione:

«Vorrei ringraziare tutti coloro che hanno contribuito con cicli di calcolo a questo progetto, ma non posso farlo: abbiamo soltanto i dati della persona che in ciascuna località ha installato e gestito il codice. Se ci avete aiutato, ci farebbe piacere che vi rimetteste in contatto con noi: inviateci cortesemente il vostro nome come vorreste che apparisse nella versione finale del lavoro.» (Messaggio trasmesso da Mark S. Manasse, 15 giugno 1990).

Nella maggior parte delle organizzazioni i collegamenti in rete oggi servono per la comunicazione di dati, spesso per applicazioni economiche o finanziarie, come EDI (Electronic Data Interchange, che consiste nello scambio di ordini, offerte e fatture per via elettronica), il trasferimento elettronico di fondi o l'elaborazione remota di transazioni. Gran parte delle organizzazioni non ha ancora iniziato a confrontarsi con le opportunità e le sfide aperte dal collegamento in rete di tutti i dipendenti. I dirigenti di quelle che l'hanno fatto hanno reagito in modo molto diverso ai cambiamenti che hanno modificato la loro autorità e il loro potere di controllo. Talvolta le reti sono state installate per ragioni di efficienza ignorando che potevano produrre trasformazioni più profonde. Di fronte alla nuova situazione, alcuni dirigenti hanno scelto di limitare il numero di persone autorizzate a inviare posta o hanno chiuso dei gruppi elettronici di discussione. Altri hanno incoraggiato l'impiego della rete per allargare la partecipazione e il coinvolgimento dei dipendenti nei processi decisionali. Quest'ultimo atteggiamento spinge le responsabilità verso il basso e attraverso l'organizzazione e genera di per sé nuovi problemi manageriali.

Una organizzazione democratica richiede personale competente, impegnato e responsabile e anche nuovi modi per dare credito alle persone. In questo modo cresce l'imprevedibilità, per ciò che riguarda sia le idee creative sia per i comportamenti non adeguati; i dirigenti dovranno scoprire nuovi tipi di incentivi per i lavoratori e nuove strutture organizzative in grado di stare al passo con questi cambiamenti.

La tecnologia delle reti cambia rapidamente e la posta elettronica in grado di trasmettere immagini, grafici, suoni e animazioni finirà per diventare disponibile su scala sempre più larga. Questi miglioramenti renderanno possibile reintrodurre alcuni indizi di contesto sociale che vengono a cadere nelle comunicazioni elettroniche odierne; anche in questo caso, tuttavia, le interazioni elettroniche non saranno mai uguali a quelle personali.

A mano a mano che un numero sempre crescente di persone avrà accesso alla comunicazione in rete, la quantità e le dimensioni dei gruppi elettronici cresceranno drasticamente: spetta ai vertici aziendali creare e plasmare le relative connessioni. L'organizzazione del futuro dipenderà in maniera significativa non solo dall'evoluzione della tecnologia delle reti, ma anche da come i dirigenti sapranno cogliere l'occasione che si presenta loro per trasformare la struttura del lavoro.

(Da «Le Scienze» n. 279, novembre 1991.)

LEE SPROULL, *già docente di scienze sociali e sociologia alla Carnegie Mellon University, insegna alla School of Management dell'Università di Boston.*

SARA KIESLER *è membro dell'Istituto di robotica della Carnegie Mellon University, presso la quale insegna scienze sociali e psicologia sociale dal 1979.*

Libertà e sicurezza nell'era dell'informatica

di Giuseppe O. Longo

Virus e vermi, frodi di risorse informatiche, divulgazione di dati personali mostrano come per lo spazio informatico i principi del diritto tradizionale non bastino

Il primo marzo 1990 ad Austin, nel Texas, alcuni funzionari dei servizi segreti americani fecero irruzione negli uffici dell'editore Steve Jackson e gli confiscarono molto materiale, tra cui le bozze di un libro di imminente pubblicazione, parecchi programmi per calcolatore e alcune macchine. Gli sequestrarono anche il sistema che gestiva il bollettino elettronico usato da Jackson per le comunicazioni tra clienti, autori e casa editrice, e tutta la corrispondenza elettronica privata che si trovava nel sistema.

I servizi segreti trattennero parte del materiale confiscato per mesi, rifiutandosi di fornire le ragioni della perquisizione. L'editore si trovò in gravi difficoltà economiche e organizzative e dovette licenziare buona parte dei suoi impiegati. Dopo parecchio tempo si venne a sapere che Jackson, lungi dall'essere colpevole di alcunché, era stato vittima di una curiosa mescolanza di ignoranza e di sospetto.

L'attività della casa editrice era quanto mai innocua, dato che pubblicava giochi di ruolo, ma i funzionari avevano scambiato i volumi di regole per «manuali del crimine informatico». In particolare erano stati tratti in inganno da *GURPS Cyberpunk*, un gioco in cui *hacker* del futuro invadono i sistemi informatici di varie aziende e dello Stato per rubarne dati di fondamentale importanza. Il manuale era stato considerato un vademecum di istruzioni per potenziali delinquenti.

Questo episodio non è certo isolato, è anzi tipico di una temperie culturale e sociale che si va addensando negli Stati Uniti e, con un certo ritardo, anche in Europa. È in seguito a fatti sconcertanti di questo tipo che alcuni specialisti di informatica, come Mitchell Kapor e John P. Barlow, hanno dato vita nel 1990 alla Electronic Frontier Foundation (EFF), il cui scopo primario è quello di contribuire a districare l'imbrogliata matassa di problemi che sono sorti a causa dei rapidissimi progressi della tecnologia informatica e telematica.

I progressi tecnici hanno introdotto, e ancor più introdurranno in futuro, profondi mutamenti nei rapporti interpersonali e sociali. Questi mutamenti coinvolgono e addirittura minacciano il delicato equilibrio tra libertà personali e protezione delle informazioni. Spesso si dice che uno dei massimi vantaggi dell'informatica onnipresente è che tutti potranno accedere a tutte le informazioni, ma è evidente che l'accesso illimitato è un'utopia, e non soltanto perché la divulgazione di certe informazioni riservate può ledere gli interessi economici o la *privacy* di una persona o di un gruppo di persone, ma anche perché una circolazione completa e senza barriere dell'informazione può portare a patologie comunicative spontanee o indotte e rende comunque troppo facili le interferenze informatiche. La casistica di queste interferenze contempla invasioni intraprese per pura e semplice curiosità, azioni dimostrative o burlesche e veri e propri atti vandalici, che comportano la distruzione di archivi e banche dati.

Tra le patologie informatiche causate da aggressione esterna hanno destato scalpore in anni recenti i cosiddetti «virus», programmi parassiti che alterano in modo più o meno grave i sistemi in cui riescono a infiltrarsi e che hanno la caratteristica di moltiplicarsi e diffondersi per contagio, un po' come fanno i virus biologici.

I virus sono tanto più insidiosi in quanto introducono una loro copia nei programmi che invadono, così da propagare l'infezione. Più precisamente, un virus è un programma per calcolatore che si compone in genere di due parti. La prima, sempre presente, svolge la funzione di duplicazione e in essa si riconoscono le sezioni per l'installazione del virus in memoria, per la sua copiatura su disco o per l'agganciamento a un archivio o a qualunque altro codice eseguibile. La seconda parte, che non sempre è presente, è quella destinata a compiere i danni: spesso si compone di una sezione di verifica (il virus per entrare in azione aspetta che accada qualcosa, per esempio che sia una certa ora di un certo giorno) e di una sezione che esegue le attività previste.

I virus si manifestano di solito tramite i loro effetti, a meno che il sistema non sia protetto da un particolare programma, detto, per restare nella metafora biologica, programma vaccino (locuzione quanto mai curiosa, se si pensa alla sua etimologia). Il fenomeno delle patologie informatiche non è affatto sorprendente: la grande complessità di questa tecnologia rende vulnerabili i sistemi, che non sempre sono protetti in modo adeguato, per ingenuità, per ragioni economiche, o semplicemente perché non si possono prevedere tutti i tipi di attacco ai quali sono soggetti. Si può dire che proprio le caratteristiche (flessibilità, accessibilità, trasparenza e così via) che rendono ideale una rete contribuiscono nel contempo alla sua vulnerabilità.

Ma chi fabbrica i virus? Non sempre si tratta di malintenzionati animati dalla volontà di nuocere, per vendetta o per interesse personale. Spesso sono gli *hacker*, i patiti dell'informatica che, desiderosi di dimostrare a se stessi e agli altri la propria bravura, lanciano in una rete qualche programma replicante. A volte sono gli stessi produttori di software che, non sentendosi abbastanza tutelati sotto il profilo giuridico, tentano, con questi metodi un po' brutali, di scoraggiare gli utenti dal copiare gratis i loro programmi. In certi casi i responsabili sono addirittura gli specialisti di software, che cercano di studiare in questo modo le leggi con cui si propagano i virus in un certo ambiente (all'inizio degli anni ottanta il fenomeno della propagazione virale nelle reti fu studiato alla Xerox con il programma eponimo Worm).

Il fenomeno dei virus ha stimolato un'ampia produzione di programmi an-

tidoti o «vaccini». Ma la costruzione degli antidoti è lunga e laboriosa e non sempre dà i risultati sperati. Così il campo tradizionalmente dinamico del software, in cui la mobilità e la trasparenza sono fattori essenziali di sviluppo, si trova sottoposto a vincoli che tendono a rallentarne, se non a cristallizzarne, l'evoluzione. Dato poi che molti degli enti colpiti dal flagello dei virus preferiscono non parlarne, per quello che alcuni hanno definito il «complesso dello stupro», si capisce che quanto emerge del problema non è che parte di una realtà molto più vasta e preoccupante.

Nonostante le valutazioni contrastanti degli esperti sulla portata reale di questi programmi parassiti, il pericolo sembra realissimo: alcuni, per esempio, si chiedono che cosa accadrebbe se venissero attaccati i sistemi dei servizi segreti, degli eserciti o delle grandi imprese produttrici di beni di consumo. Vi sono forti pressioni affinché del problema si parli più apertamente e si adottino efficaci misure preventive: anche se alcuni sdrammatizzano, si ha infatti la sensazione che i sistemi informatici attuali, e ancor più quelli del futuro, con il loro elevatissimo grado di interconnessione, offrano ai malintenzionati troppi pertugi dove infilarsi. Per esempio alcuni costruttori di virus hanno già cominciato a usare i programmi vaccino come veicoli per il loro software infettato: i clienti pagano per avere un antidoto che poi contamina il loro sistema, così che al danno si aggiunge la beffa.

L'esempio più clamoroso di questo diabolico espediente riguarda la serie di vaccini Flu-Shot (iniezione antinfluenzale), messa a punto da Ross M. Greenberg. L'agente antivirale Flu-Shot IV veniva messo in vendita, tramite un bollettino informatico gestito dallo stesso Greenberg, al modesto prezzo di 10 dollari e aveva incontrato un buon successo. A un certo punto, tuttavia, qualche «untore» infettò il Flu-Shot IV con un virus, così che i clienti pagavano 10 dollari per prendersi l'infezione. Greenberg corse ai ripari con il vaccino Flu-Shot Plus, che neutralizzava l'antidoto infettato, e si riportò in vantaggio: ma questa sorta di guerra tra guardie e ladri è destinata a continuare.

La complessità dei sistemi informatici sta raggiungendo livelli che si avvicinano a quelli biologici: non stupisce quindi che in essi si sviluppino patologie che hanno molte somiglianze con quelle che colpiscono gli esseri viventi. Con l'informatica onnipresente gli elaboratori vengono inseriti in una famiglia di reti sempre più ampie e integrate, che si estendono su tutto il globo e in cui scorre una massa crescente di dati. Questo flusso potenzialmente senza confini di messaggi e di programmi conferisce all'invasione virale caratteristiche epidemiche: l'eliminazione di ogni barriera che si frapponga alla libera circolazione dell'informazione da tutti i sistemi a tutti gli altri crea una sorta di sconfinato oceano informatico, una promiscua cassa di risonanza planetaria in cui le perturbazioni, anche patologiche, si diffondono senza freno. Questo lato oscuro della complessità e della promiscuità sembra dunque obbligarci a introdurre steccati, filtri e divieti, e il mito di un'informazione senza barriere riceve un colpo durissimo.

Vi sono altri tipi di inconvenienti che si accompagnano all'interconnessione sempre più spinta dei calcolatori e alla concomitante estensione delle attività e delle transazioni in cui l'immaterialità dell'informazione codificata si sostituisce progressivamente alla solidità degli oggetti. La rarefazione o la perdita dei contatti interpersonali diretti, per esempio, facilita certi tipi di frodi basate sull'impiego della firma elettronica in luogo della firma tradizionale: impadronendosi della mia firma in codice, un concorrente può trasmettere messaggi, ordini o disdette a mio nome, e con suo vantaggio personale. Viceversa, per evitare di dover tener fede agli impegni assunti, può cercare di attribuire a me i suoi messaggi, accusandomi di essermi impadronito della sua firma. Un esempio abbastanza frequente di frodi di questo tipo è il furto di denaro tramite Bancomat o il trasferimento illecito di fondi da un conto bancario a un altro.

Altri tipi di reati riguardano la sottrazione non di denaro o di beni, bensì di risorse squisitamente informatiche. Tipico è il caso dei vermi, che trovano nelle reti il terreno di diffusione ideale. Il 2 novembre 1988 uno di questi programmi fece la sua comparsa su Internet, la principale rete di collegamento tra università, centri di ricerca e altri grandi enti nordamericani. L'Internet Worm, come fu subito battezzato, era costituito da un programma principale e da un programma vettore o di aggancio. Il primo, una volta installato su una macchina, cominciava a raccogliere informazioni sui sistemi ai quali la macchina poteva collegarsi tramite la rete. Questa indagine avveniva mediante la lettura di archivi pubblici e l'esecuzione di programmi standard che fornivano la configurazione attuale della rete. Il programma vettore doveva poi essere compilato ed eseguito sulla macchina da infettare.

Il verme dell'Internet sfruttava a proprio vantaggio alcuni difetti del software ordinario del sistema Unix e dei meccanismi che semplificano la distribuzione delle risorse nelle reti locali. Inoltre approfittava delle debolezze nella gestione dei codici d'accesso. Questi codici, di cui si devono servire gli utenti per avere accesso al sistema, sono cifrati. Per consentire l'accesso, la versione cifrata viene confrontata con una versione contenuta in un archivio apposito. A queste versioni cifrate dei codici si può accedere anche tramite comandi non privilegiati perché la protezione è affidata alla difficoltà e al costo dell'operazione di decifrazione. Risalire dalla versione cifrata alla versione in chiaro dei codici d'accesso, infatti, è arduo, ma in genere gli utenti usano parole semplici e ovvie, così che la decifrazione è spesso immediata. Ottenuto il codice d'accesso, Internet Worm lo usava per infiltrarsi nei dispositivi collegati alla rete e infettarli.

Contro questo tipo di invasioni e di

Un bestiario subdolo e minaccioso

Come nel caso dei microrganismi biologici, anche quelli informatici si sono differenziati in generi e specie diversi, che si moltiplicano all'aumentare della complessità e dell'interconnessione dei sistemi e che sono stati scoperti nei sistemi e nelle reti di tutto il mondo. Oltre che di virus, gli esperti oggi parlano di batteri, di cavalli di Troia, di conigli, di bombe logiche e di vermi. Dietro questa terminologia pittoresca si nascondono programmi dannosi, il cui scopo è quello di distruggere i dati o di intasare i sistemi in modo da bloccarne il funzionamento. Per esempio un coniglio, come appunto suggerisce il nome, si replica rapidamente saturando le memorie e le capacità di elaborazione del sistema. Non si riproduce nei programmi e mira all'intasamento specifico degli organi di macchina, a differenza del batterio che, pur inviando copie di se stesso, non mira a saturare le risorse del sistema. Il cavallo di Troia è, come quello classico, un programma che in apparenza esegue compiti inoffensivi dietro i quali tuttavia si celano intenti dannosi per l'integrità o per la segretezza delle informazioni contenute nel sistema.

La bomba logica è come una bomba a orologeria: affinché le istruzioni producano un certo effetto è necessario che accada qualcosa, per esempio che venga attivata una certa procedura o che il calendario segni una certa data e l'orologio una certa ora. Infine il verme è un programma che diffonde copie di se stesso nei sistemi connessi in rete, allo scopo di saturare i canali di trasmissione e le altre risorse con una mole enorme di messaggi. Un virus presenta tutte le caratteristiche di questi programmi poiché si diffonde nei sistemi, si aggancia ad altri programmi, per agire attende che sia verificata una certa condizione e, infine, si riproduce a velocità più o meno elevata.

truffe informatiche possono essere adottate tecniche crittografiche, con le quali più che impedire ai terzi non autorizzati l'accesso al sistema si impedisce loro di comprendere e sfruttare i messaggi trasmessi. La cifratura dei messaggi con chiavi note solo agli utenti autorizzati costituisce un'arma spesso efficace, anche se le tecniche di forzatura dei cifrari vengono perfezionate di continuo.

Ci vorrà ancora un certo tempo perché gli effetti che l'informatica onnipresente può avere su molti settori della società siano afferrati in tutta la loro portata e in tutte le loro sfumature, perché questa comprensione richiede una valutazione precisa delle profonde innovazioni introdotte dalla tecnologia. Ancora più tempo ci vorrà prima che il legislatore, prendendo atto delle novità, riesca a regolarle con una serie di norme eque e razionali. Il ricorso al diritto tradizionale serve fino a un certo punto, perché le situazioni in cui esso si è formato e i principi su cui si basa sono molto diversi da quelli che si profilano nell'era dell'informatica onnipresente. Per esempio, il concetto tradizionale di proprietà implica che il possesso e il godimento di un bene spettino al legittimo proprietario e il furto si configura come una sottrazione del bene, che comporta l'impossibilità di goderne da parte del legittimo proprietario. Ma fino a che punto ciò è vero se il bene è un'informazione? In effetti l'informazione ha carattere moltiplicativo e la si può sottrarre, per esempio ricopiandola, senza per questo privarne il proprietario legittimo che può continuare a goderne. Le caratteristiche immateriali dell'informazione fanno insomma sfumare la distinzione tradizionale tra la cosa e la sua riproduzione e le conseguenze di questa identificazione progressiva possono essere cospicue.

Un altro esempio: come si possono configurare e definire i reati contro il diritto di autore in un'epoca in cui certe opere sono il frutto della collaborazione di molte persone, che magari risiedono in paesi diversi con legislazioni diverse e dialogano attraverso una rete apportando contributi eterogenei ed estemporanei, alla cui paternità è difficile risalire?

Tra gli informatici, e specie tra gli *hacker*, c'è una forte tendenza a considerare i beni informatici (programmi e dati) come beni collettivi, che vanno messi a disposizione di tutti senza privilegi o esclusioni. A ciò si oppongono le case produttrici di software e di hardware, che considerano il patrimonio informatico fonte di guadagno. Tipico di questo contrasto fu il caso della nuPrometheus League, un gruppo di informatici professionisti che distribuì a privati alcuni codici originali della Apple, l'azienda che costruisce il famoso calcolatore personale Macintosh. Si trattava di una protesta contro la causa che la Apple aveva intentato alla Hewlett Packard Company e alla Microsoft Corporation accusandole di aver infranto i diritti di proprietà vendendo software che somigliava alla sua interfaccia di utente. La nuPrometheus League, costituita da un gruppo di «artisti del software per la diffusione dell'informazione», aveva dichiarato di agire all'unico scopo di far godere a tutti i frutti del genio di alcuni impiegati della Apple, che l'azienda avrebbe invece voluto tenere per sé.

Un altro tema scottante è quello della divulgazione, spesso a scopi commerciali, di dati relativi a privati. Esistono agenzie specializzate nella raccolta di numeri telefonici, indirizzi, date di nascita e così via. Questi dati vengono integrati per ricavarne il profilo di clienti o acquirenti potenziali e venduti poi a catene di negozi, che se ne servono per incrementare le vendite con campagne pubblicitarie personalizzate. Negli Stati Uniti ha destato allarme nel pubblico la recente alleanza tra due agenzie per la raccolta di informazioni, la Equifax Marketing Decision Systems e la Lotus Development Corporation, che hanno messo in vendita a prezzo modesto un gruppo di dischi ottici contenenti i dati relativi a 80 milioni di famiglie e 120 milioni di individui. Immediatamente 30 000 persone hanno scritto chiedendo che i loro nomi fossero cancellati dalla base di dati. È evidente che queste informazioni potrebbero essere usate anche per scopi meno innocui, preludendo ad agghiaccianti possibilità di controllo e di condizionamento sociale o addirittura alle forme più sinistre di totalitarismo poliziesco.

La maggior parte delle difficoltà sociali e giuridiche provocate dalla diffusione delle reti e dalle interazioni da esse consentite deriva dalla natura immateriale e insieme concretissima dell'informazione. Fino a tempi recenti dell'informazione ci si è occupati poco, anche se la sua importanza fondamentale è sempre stata riconosciuta, e questo relativo disinteresse si riflette nel divario, allargatosi via via fino a qualche decennio fa, tra la raffinatezza delle teorie della materia e dell'energia e la gracilità delle riflessioni relative alla comunicazione e all'informazione. Solo negli anni a cavallo della seconda guerra mondiale fu riconosciu-

Strategie di difesa

Le difese contro i virus informatici possono essere di tipo profilattico, diagnostico e terapeutico. Prima di andare a tavola ci laviamo le mani, e questa elementare precauzione ci evita parecchi guai, ma nel campo informatico siamo ancora a uno stadio igienico primitivo. Pochi si lavano le mani, molti inghiottono cibo raccattato a terra o mangiano nel piatto di sconosciuti. Quindi, come regola generale, bisogna moltiplicare le cautele: evitare lo scambio di dischetti con l'esterno, usare le protezioni contro la scrittura, effettuare confronti periodici tra software certamente sano e il software esistente nella macchina, evitare l'esecuzione di programmi ricevuti tramite posta elettronica, riservare un dischetto apposito protetto da scrittura per l'avvio di ciascun sistema e così via.

Esistono anche programmi antivirali ad azione preventiva, che dalla memoria centrale controllano tutta l'attività del sistema, filtrando i tentativi di accesso agli archivi e le richieste di servizi del sistema operativo da parte di altri programmi, verificando i programmi che vengono caricati e scaricati, le tabelle e le strutture di controllo. Quando un programma «custode» rileva un'operazione che potrebbe indicare un tentativo di contaminazione virale, interrompe l'attività del sistema e avverte l'utente. Programmi del genere, tuttavia, non sono efficaci contro i virus che attaccano i settori dei dischi adibiti al caricamento e inoltre possono causare molti falsi allarmi.

Se il virus è già penetrato nel sistema bisogna scoprirne le tracce per evitare che si diffonda. Anche in questa fase diagnostica si possono effettuare controlli o affidarsi a programmi vaccino. Fra i controlli menzioniamo: il riscontro dei programmi con copie sane e protette; il controllo della lunghezza, della data e dell'ora dell'ultima modifica dei programmi; il controllo del tempo di esecuzione, che di solito viene alterato dalla presenza di un virus. Le verifiche possono essere eseguite anche da un vaccino: ogni volta che viene eseguito un programma le modalità di esecuzione vengono confrontate con quelle dell'esecuzione precedente (o con le informazioni critiche sul sistema al momento dell'installazione) e ogni difformità viene segnalata all'utente. Questi vaccini tuttavia non hanno un'efficacia assoluta e possono essere anche neutralizzati dai virus.

Vi sono infine le misure terapeutiche, che consistono a loro volta nell'adozione di procedure o nell'impiego di programmi speciali, i quali tuttavia si possono costruire solo quando il virus è perfettamente conosciuto, cosa che può richiedere anche diversi anni. La difficoltà delle cure consiglierebbe di potenziare le difese preventive: i progettisti e gli utenti dovrebbero dedicare più attenzione ai problemi della sicurezza.

ta esplicitamente l'esistenza del mondo della comunicazione, con tutta la sua sfaccettata complessità. Nel 1948, soprattutto per merito di Claude Shannon e di Norbert Wiener, il concetto di informazione, fino a quel momento dotato di uno statuto vago se non equivoco, entrò nel novero delle discipline formali. Si riconobbe che accanto al mondo della materia, dove regnano masse, urti e forze, vi è l'universo della comunicazione, del significato, dell'organizzazione, della forma, dove valgono leggi diverse da quelle della fisica. Per esempio, nel mondo dell'informazione non esistono leggi di conservazione: se il numero dei partecipanti al processo comunicativo cresce, l'informazione, anziché dividersi, aumenta. L'assenza di informazione può essere un'informazione. Non esiste informazione senza supporto materiale, ma l'informazione non si può ridurre al suo supporto materiale: essa sta nella complessa interazione tra l'osservatore e le differenze tra le diverse parti del supporto. Nel mondo dell'informazione ogni cosa può rappresentare un'altra cosa, in base all'istituzione di un codice convenzionale e arbitrario, mentre nel mondo della fisica ogni cosa può rappresentare solo se stessa.

Bastano questi pochi cenni per capire quanto il mondo della comunicazione, al quale l'informatica onnipresente sta dando sostanza, sia lontano dal mondo della materia nel quale si sono formati in gran parte i nostri concetti filosofici, scientifici, giuridici e sociali. Ecco perché è difficile trasformare questi concetti in modo da adattarli alla nuova realtà che si sta dispiegando. La natura impalpabile dell'informazione sembra rendere vacui molti concetti che nel mondo della materia hanno una provata solidità, ma se si riflette che, tramite l'attività dell'uomo e della società umana, l'informazione interagisce con il mondo della materia, si capisce che non vi è motivo per non accordare la stessa solidità a quei concetti anche quando li si contempli sotto il profilo dell'informazione. Il furto di un'automobile sembra un atto molto più concreto che il furto di un programma, ma forse quel programma serve a produrre migliaia di automobili e quindi la sua potenzialità operativa restituisce al furto un'innegabile concretezza. Nello stesso tempo il proprietario dell'automobile rubata non può più goderne, mentre il furto del programma può configurarsi come una semplice copiatura, che consente al primo proprietario di continuare a possederlo. Sono proprio queste ambiguità derivanti dalla natura moltiplicativa e non conservativa dell'informazione e dalla confusione tra i diversi livelli di concretezza a dare origine a problemi. Si tratta ora di approfondire questi concetti per arrivare a un compromesso ragionevole e accettabile tra libero accesso e protezione della informazione.

Viviamo in un mondo sempre più virtuale e sempre più invaso da riproduzioni e da simulazioni, e se è ancora difficile attribuire alle simulazioni tutto lo spessore e tutta l'efficacia che esse hanno, è altrettanto difficile distinguere la realtà dalla sua imitazione. Come è facile cadere nella tentazione di negare concretezza all'informazione, per esempio quando il furto di dati viene considerato meno grave del furto di beni materiali, così è facile scambiare la simulazione con la realtà, come insegna il caso di Steve Jackson.

L'informatica onnipresente e la tecnologia delle reti ci pongono oggi in una situazione pionieristica: davanti a noi si spalancano le vaste e inquietanti distese di quello che John P. Barlow, uno dei fondatori della Electronic Frontier Foundation, chiama Ciberspazio: «Il Ciberspazio - dice Barlow - è una regione di frontiera in cui errano i pochi tecnologi aborigeni e i ciberteppisti capaci di sopportare l'austerità delle sue selvagge interfacce elettroniche, l'incompatibilità dei suoi protocolli di comunicazione, gli steccati dei proprietari, le ambiguità culturali e giuridiche e l'assenza quasi totale di mappe e di metafore utili».

È questa difficile terra di frontiera, che molti hanno paragonato al West, che va conquistata e dissodata se non si vuole che sia lei a imporci la sua legge non scritta, violenta, fluttuante, una legge che si presta ad abusi perché è fatta dal più forte.

(Da «Le Scienze» n. 279, novembre 1991.)

GIUSEPPE O. LONGO, *direttore di ricerca al Centre International des Sciences Mécaniques di Udine, insegna teoria dell'informazione all'università di Trieste.*

I rischi del software

di Bev Littlewood
e Lorenzo Strigini

La limitazione dell'uso di calcolatori in sistemi in cui un errore del software può metterne in pericolo la sicurezza di funzionamento è legata all'affidabilità relativa dei programmi

Molti di noi hanno avuto qualche esperienza di errori di calcolatori: magari ci è stata spedita automaticamente una bolletta sbagliata, o il lavoro che avevamo svolto su un calcolatore ci è stato rovinato da un qualche problema interno. Questi inconvenienti, spesso causati da difetti del software (cioè i programmi eseguiti dai calcolatori), sono minimi in confronto alle possibili conseguenze di errori di calcolatori usati in sistemi critici. Di recente, difetti del software hanno causato interruzioni su larga scala del servizio telefonico negli Stati Uniti; fu forse a causa di un problema di software che durante la guerra del Golfo il sistema missilistico Patriot non riuscì a intercettare il missile iracheno che uccise 28 soldati statunitensi. Di fatto, i difetti del software sono in genere una minaccia più insidiosa e molto più difficile da controllare che non i guasti fisici.

Il problema nasce essenzialmente dalla complessità dei prodotti software, la quale aumenta la probabilità che un errore di progetto non venga corretto e resti nel prodotto finale. L'ingegneria convenzionale (non software) ha fatto grandi progressi nella comprensione e nel controllo dei guasti fisici e, anche se a volte si trovano difetti di progetto in prodotti che non includono calcolatori, in genere la relativa semplicità di queste macchine rende il problema molto meno serio di quanto sia diventato nel software. Incidentalmente, va detto che i problemi che discutiamo non sono limitati ai più avanzati prodotti per uso spaziale o militare. Anche per prodotti comuni c'è una tendenza a introdurre software complesso in ruoli critici, come il controllo dello sterzo in automobili a quattro ruote sterzanti o dei sistemi frenanti antibloccaggio.

Qui di seguito esamineremo le ragioni principali dell'incertezza che circonda l'affidabilità del software, mostrando come la nostra capacità di misurarla sia largamente insufficiente per i livelli di affidabilità che sono a volte richiesti. In sistemi critici, come per esempio i sistemi di sicurezza di un impianto chimico pericoloso, può darsi che si possa garantire un livello di sicurezza adeguato solo limitando il ruolo del software.

Almeno in teoria, si possono produrre programmi del tutto privi di difetti. Il software non si consuma, come fanno invece i macchinari e i materiali: tutti i difetti di progetto sono già presenti dal momento in cui il software viene caricato nel calcolatore. In linea di principio, questi difetti si potrebbero trovare ed eliminare una volta per tutte. Inoltre, dovrebbe esser possibile provare matematicamente che un programma è corretto.

Eppure la produzione di software perfetto rimane un obiettivo apparentemente irraggiungibile. Nonostante collaudi rigorosi e sistematici, la maggior parte dei grossi programmi, alla consegna, contiene ancora difetti. La ragione è la complessità del software. Un programma di poche decine di righe può contenere decine di decisioni, permettendo migliaia di diversi percorsi nell'esecuzione del programma (programmi usati in applicazioni abbastanza critiche variano, come lunghezza, da decine fino a milioni di righe di codice). Se durante l'esecuzione un programma prende una decisione errata, ciò può avvenire perché la combinazione di dati di ingresso che causa l'errore non si era mai verificata in fase di collaudo, quando il problema poteva essere riconosciuto e corretto. Può darsi che la situazione che causa quella configurazione di ingressi non fosse stata capita, o magari nemmeno prevista: il progettista ha programmato «correttamente» la reazione sbagliata, oppure non ha minimamente considerato quella situazione. Questo tipo di difetti (causati da errori nella specifica piuttosto che nella realizzazione del programma) è il più difficile da eliminare.

Inoltre, le specifiche di un sistema spesso vengono modificate durante il suo sviluppo, via via che la funzione a cui il sistema è destinato viene cambiata, o compresa meglio. Le implicazioni di questi cambiamenti possono estendersi a ogni parte del sistema, rendendo inadeguato il progetto esistente. Infine, l'uso effettivo del sistema può esser diverso da quello previsto. Nell'analisi dei fallimenti dei missili Patriot nell'intercettazione degli Scud, si è trovato che una delle possibili cause era un accumularsi di imprecisioni nel modo in cui un calcolatore misurava il tempo. Eppure questo calcolatore funzionava secondo le specifiche: era previsto che il sistema Patriot fosse spento e riattivato abbastanza spesso perché l'errore totale accumulato non diventasse mai pericoloso. L'uso del sistema in maniera imprevista fece sì che una imprecisione minore diventasse un problema serio.

Un altro ostacolo alla creazione di software perfettamente affidabile sta in una caratteristica intrinseca di tutti i sistemi digitali. Molti sistemi fisici sono sostanzialmente «continui», cioè possono essere descritti con funzioni matematiche regolari, in cui piccolissime variazioni negli stimoli a cui il sistema è sottoposto producono piccolissime differenze nelle risposte. Invece, la più piccola perturbazione possibile nello stato di un calcolatore digitale (il cambiamento di un bit da 0 a 1 o viceversa) può produrre effetti molto grandi. Un singolo carattere sbagliato nella specifica di un programma per il controllo di un missile Atlas, che portava la prima sonda interplanetaria statunitense, il *Mariner 1*, fu la causa ultima di una deviazione del missile dalla sua rotta, che rese necessario distruggere missile e sonda poco dopo il lancio.

In tutti gli altri rami dell'ingegneria, la semplicità dei progetti e la gradualità dei cambiamenti sono le basi principali per una progettazione affidabile. Nell'ingegneria del software, il grado di novità e la flessibilità senza precedenti che sono possibili per ogni nuovo prodotto

costituiscono una tentazione a dimenticare questi principi. Applicazioni interamente nuove possono essere progettate con apparente facilità, dando un falso senso di sicurezza a quei produttori e clienti che non conoscono a fondo i problemi specifici del software. Anche l'aggiunta di una nuova funzione a un programma esistente può produrre cambiamenti inaspettati nella esecuzione delle funzioni preesistenti.

La difficoltà di rappresentare in un progetto regole di decisione complesse e di prevedere il comportamento di sistemi discontinui complessi non è limitata al software. Per esempio, i progettisti dei circuiti integrati digitali complessi hanno problemi simili. Il software, però, è tuttora il mezzo preferito per incorporare in un prodotto regole estremamente complesse, specializzate per una applicazione particolare.

Oltre agli errori di progetto involontari, anche difetti introdotti apposta in un sistema possono produrre comportamenti inaccettabili. I problemi della sicurezza contro attacchi intenzionali, della privacy e della crittografia richiedono altre considerazioni, che sono al di fuori dell'argomento di questo articolo.

Dato che produrre software perfetto è in pratica impossibile, come possiamo decidere se un programma è abbastanza affidabile per l'uso a cui è destinato? In primo luogo, i requisiti di sicurezza di un sistema vanno stabiliti con attenzione, in base all'applicazione a cui il sistema è destinato. Questi requisiti possono variare enormemente da una applicazione all'altra. Per esempio, gli Stati Uniti richiedono che il loro nuovo sistema di controllo del traffico aereo non possa essere fuori servizio per più di tre secondi all'anno. Negli aerei da trasporto di linea, la probabilità di certi guasti catastrofici non deve essere maggiore di una su un miliardo (10^{-9}) per ora di volo.

Nello stabilire i requisiti di affidabilità per un calcolatore, bisogna anche tener conto dei possibili benefici in più che ci si possono aspettare dal suo uso: anche fare a meno del calcolatore può causare un danno. Per esempio, gli aerei militari sono necessariamente più pericolosi di quelli civili. Per sopravvivere in combattimento ci vogliono alte prestazioni, e questo vieta progetti troppo prudenti: un nuovo calcolatore può migliorare le probabilità di sopravvivenza dell'aereo, anche se è meno sicuro rispetto ai calcolatori usati negli aerei commerciali. Analogamente, nel progetto di aerei civili «*fly-by-wire*» (nei quali i comandi sono trasmessi da calcolatori), come lo Airbus A320 o il Boeing 777, la possibilità che il software causi incidenti va pesata contro la possibilità che esso *eviti* incidenti, che potrebbero essere causati da errori del pilota o guasti delle apparecchiature.

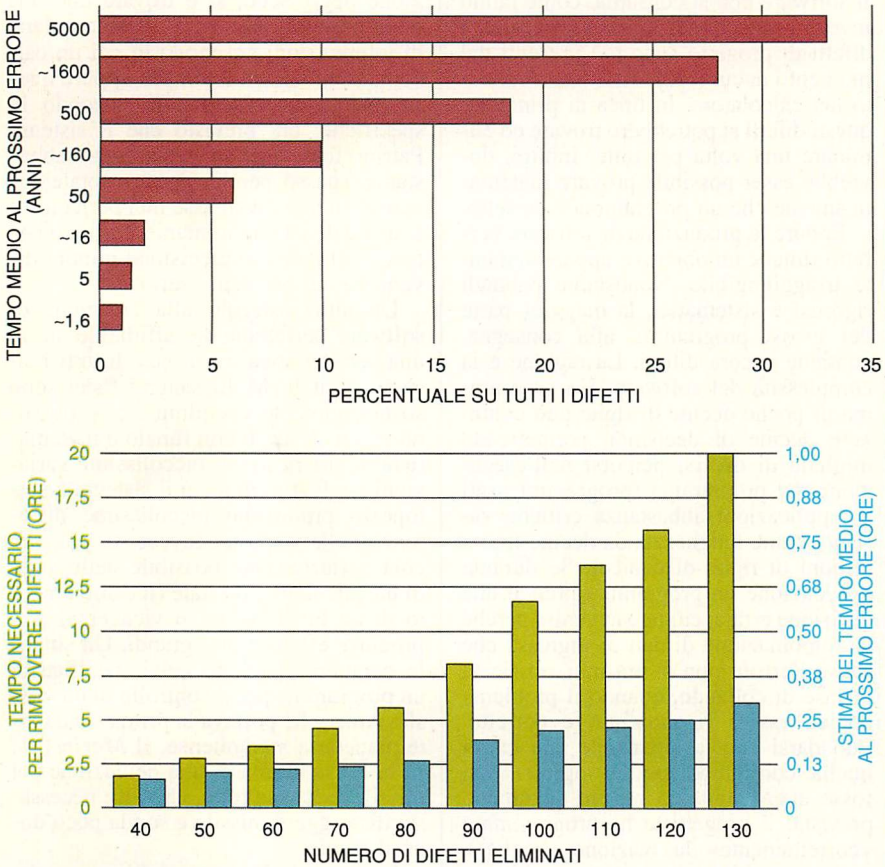
Noi crediamo che per il software ci siano pesanti limiti alla fiducia che possiamo giustificatamente riporre in previsioni di alta affidabilità. Per spiegare questo punto di vista, dobbiamo considerare le diverse possibili fonti di questa fiducia; la più ovvia è il collaudo, in cui si esegue il programma osservandone il comportamento ed eliminandone i difetti qualora questi si manifestino con un errore. In questo processo l'affidabilità del software aumenta, e i dati raccolti possono in genere essere usati, con tecniche avanzate di estrapolazione, per avere una misura accurata dell'affidabilità raggiunta dal programma.

Purtroppo questo approccio funziona solo quando i requisiti di affidabilità sono piuttosto modesti (dell'ordine di un errore ogni qualche anno) in confronto a quelli spesso stabiliti per applicazioni critiche. Per credere a un'affidabilità dell'ordine di 10^{-9} errori per ora, dovremmo tenere in esecuzione il programma per un tempo molto maggiore di 10^9 ore, vale a dire 100 000 anni. Chiaramente ciò non è fattibile. Con i periodi di collaudo normalmente possibili, il livello di sicurezza che si potrebbe provare sarebbe di molti ordini di grandezza minore del necessario.

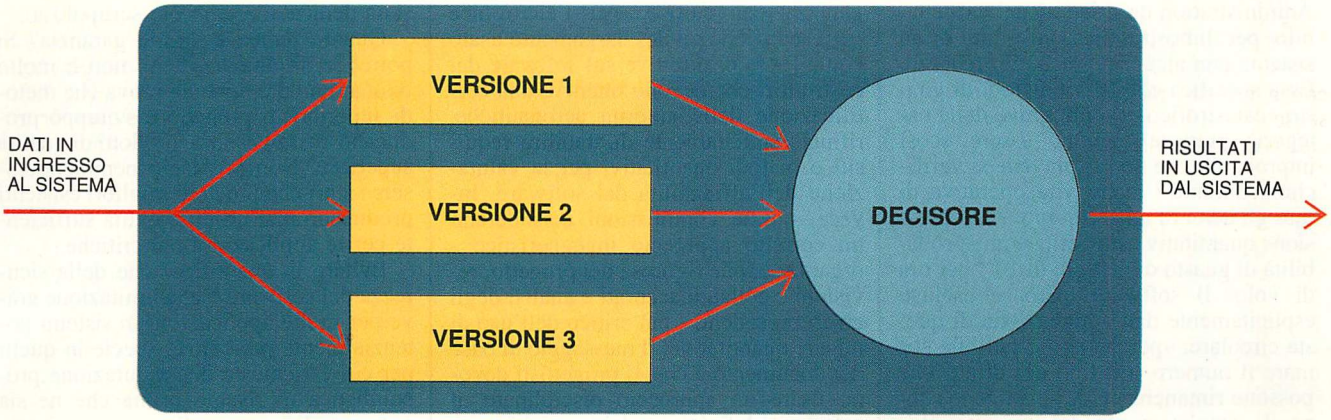
Il problema qui è una «legge dei ricavi decrescenti». Quando continuiamo a collaudare e correggere un programma molto a lungo, alla fine i difetti che troviamo sono così «piccoli» che correggerli ha effetto pressoché nullo sull'affidabilità complessiva del programma. Edward N. Adams del Thomas J. Watson Research Center della IBM ha analizzato sperimentalmente le «dimensioni» dei difetti, a partire da una base di dati che descriveva l'uso di un sistema software, in tutto il mondo e per un tempo totale equivalente a migliaia di anni.

La scoperta più straordinaria è che circa un terzo di tutti i difetti scoperti erano difetti «da 5000 anni»: ciascuno di essi produceva errori solo una volta ogni circa 5000 anni di esecuzione (gli altri difetti causavano errori con frequenze che differivano fra loro anche di vari ordini di grandezza). Il motivo per cui questi difetti «rari» erano una gran parte dell'insieme di tutti i difetti è che quelli con frequenza di errori maggiore erano stati notati, e perciò rimossi, prima. Alla fine, solo i difetti «da 5000 anni» resteranno a rendere inaffidabile il software, e rimuoverne uno qualsiasi migliorerà l'affidabilità in misura trascurabile.

Fare previsioni per estrapolazione dal processo di collaudo e correzione implica anche una ipotesi ingiustificata, cioè che un difetto, una volta notato, sia semplicemente corretto. In realtà il tentativo



Anche programmi ben collaudati possono conservare difetti. Edward N. Adams della IBM ha scoperto che buona parte di essi sono tali da produrre ciascuno un errore ogni circa 5000 anni di esecuzione (*in alto*). Ciò rende il collaudo e la correzione un lavoro a ricavi decrescenti: nel caso di un sistema militare di comando e controllo (*in basso*), il tempo necessario a eliminare i difetti cresce ben più velocemente dell'incremento nella affidabilità stimata, espressa come tempo medio fino al prossimo errore. Per chiarezza, si sono usate due diverse scale per l'asse dei tempi.



La ridondanza protettiva può migliorare l'affidabilità del software. Le versioni del programma sono sviluppate da diversi progettisti. Durante l'esecuzione, il «decisore» determina il risultato effettivo del sistema scegliendo, per esempio, il valore «votato» da una maggioranza delle versioni, o il valore di mezzo fra numeri da esse prodotti. A sua volta il decisore può essere un sistema ridondante, o anche non essere realizzato con calcolatori, ma per esempio con attuatori idraulici.

di riparare un difetto a volte fallisce; anzi, potrebbe anche causare l'introduzione di un nuovo difetto. E dato che di quest'ultimo non si saprebbe nulla, non se ne potrebbero prevedere le ripercussioni sull'affidabilità del programma; in particolare, esso potrebbe essere anche meno affidabile di quanto fosse prima che il difetto venisse trovato.

Pertanto, un atteggiamento prudente sarebbe quello di non prendere in considerazione la storia precedente all'ultimo errore osservato. Questa precauzione, importante per software che ha un ruolo critico per la sicurezza, richiederebbe che un valutatore considerasse il software, dopo l'ultima correzione, come un programma completamente nuovo. Solo il più recente periodo di funzionamento senza errori verrebbe preso in considerazione per valutare l'affidabilità del programma. Ma anche questa procedura prudente non può darci grande fiducia: la nostra ricerca ha mostrato che, sotto ipotesi matematiche piuttosto plausibili, c'è solo una probabilità del 50 per cento che il programma continui a funzionare correttamente per un tempo eguale a quanto ha già fatto.

In realtà, questo problema di valutazione è ancora più serio. Per aver fiducia nei numeri ottenuti dal collaudo, questo deve sottoporre il programma a situazioni che potrebbe incontrare nell'uso reale; occorre che quei valori dei dati di ingresso che causano errori siano incontrati con la stessa frequenza nel collaudo e nell'uso effettivo. In più, bisognerebbe che il collaudatore fosse sempre in grado di decidere se il risultato del programma è effettivamente corretto. I problemi sono simili a quelli incontrati nel progetto e nella realizzazione del software stesso. Per costruire un ambiente di collaudo realistico, dobbiamo essere sicuri di aver pensato a tutte le circostanze che il software incontrerà. Le circostanze impreviste sono un rischio per il collaudatore come lo sono per il progettista. Sarebbe saggio conservare un po' di scetticismo sul realismo del collaudo, e perciò sulla accuratezza delle misure ottenute.

Il problema nel dimostrare livelli estremi di affidabilità o sicurezza per un dato pezzo di software è semplicemente la mancanza delle informazioni necessarie. Per software complesso, sembra di dover ammettere che la fiducia che si può riporre in un programma debba avere pesanti limitazioni. La semplice osservazione del comportamento di un programma non può chiaramente garantire che esso funzionerà bene per 100 000 anni. In quale altro modo potremmo giustificare questa fiducia?

Un prerequisito ovvio per un'alta affidabilità è che si usino metodi di produzione che diano buone probabilità di ottenere questa affidabilità. Un sistema è ricorrere a tecniche «formali», in cui si usano dimostrazioni matematiche per garantire che un programma funzioni secondo le specifiche. Queste tecniche riscuotono oggi grande interesse. Anche se per ora la loro applicazione è limitata da problemi pratici, esse possono evitare gli errori di programmazione che avvengono nella traduzione dalle specifiche al programma vero e proprio.

Sfortunatamente, le specifiche devono essere anch'esse «formali». In altre parole, le necessità dell'utilizzatore del software devono essere espresse in un linguaggio matematico. Questo non è un compito facile: richiede una scelta attenta degli aspetti del mondo reale che devono essere descritti nel linguaggio formale, e una comprensione sia dei dettagli del problema pratico dell'applicazione sia del linguaggio formale. C'è perciò una probabilità di introdurre errori durante questo processo, e non potremmo ragionevolmente affermare che il programma non produrrà mai errori.

Un altro metodo usato ampiamente (per esempio in avionica e in sistemi di controllo ferroviari) per ottenere alta affidabilità è la «tolleranza ai guasti», o ridondanza protettiva. Un modo tipico di usare la ridondanza contro i difetti di progetto è far sviluppare diverse versioni di un programma da diversi gruppi di progettisti. La speranza è che, se i progettisti fanno errori, questi siano diversi nelle varie versioni. Quando il software viene eseguito, ogni versione del programma dà la sua «opinione» su qual è un risultato corretto. Queste «opinioni» passano a uno stadio di decisione che produce un singolo risultato, e questo sarà corretto se una maggioranza delle versioni ha dato un risultato corretto.

Ci sono dati che suggeriscono che questa tecnica di «diversità di progetto» produce alta affidabilità con un buon rapporto costo-efficacia. Però diversi progettisti possono fare gli stessi errori (per esempio a causa di somiglianze nella loro cultura), o errori che, pur essendo concettualmente diversi, per caso fanno sì che le versioni producano lo stesso risultato erroneo nelle stesse circostanze. In questo caso, la decisione produrrebbe un risultato erroneo.

Per misurare l'affidabilità di software ridondante, è necessario valutare la correlazione statistica fra gli errori delle diverse versioni. Ciò si rivela, però, altrettato difficile che misurare l'affidabilità dell'intero sistema ridondante considerato come un'unica entità, e già abbiamo visto la difficoltà di questa misurazione.

Dunque, se nemmeno sulla base di prove matematiche si può affermare che un programma non sbaglierà mai, e la ridondanza non può garantire a priori l'affidabilità richiesta, sembra che l'unica scelta rimanente sia quella di misurare l'affidabilità di un programma direttamente, con metodi che, come abbiamo visto, hanno applicabilità limitata. Come si comportano le autorità di regolamentazione e gli utilizzatori di software per far fronte a questa incertezza?

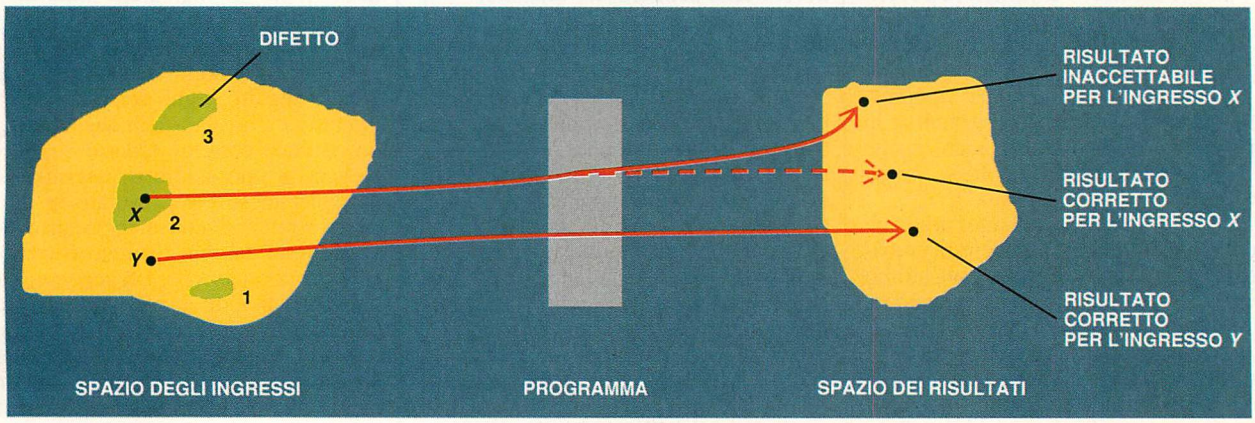
Ci sono tre approcci possibili. Il primo, assai usato, classifica errori o incidenti causati da difetti di progetto come «non quantificabili», e non specifica requisiti quantitativi per il software. Per esempio, nel campo dell'aviazione civile statunitense, la Advisory Circular 25.1309-1A della Federal Aviation

Administration descrive mezzi «accettabili» per dimostrare la conformità di un sistema con alcuni regolamenti federali. Essa specifica che le condizioni di guasto «catastrofico» (la più grave delle categorie previste) devono essere «così improbabili che non si prevede si verifichino durante l'intera vita operativa di tutti gli aerei di un certo tipo». L'espressione quantitativa suggerita è una probabilità di guasto di non più di 10^{-9} per ora di volo. Il software, però, è escluso esplicitamente dall'applicazione di questa circolare, «perché non è fattibile stimare il numero o il tipo dei difetti che possono rimanere (se ne rimangono) dopo il completamento del progetto, sviluppo e collaudo del sistema».

Anche il documento DO-178A/EUROCAE ED-12A (della Commissione radio tecnica per l'aeronautica e dell'Organizzazione europea per l'elettronica per l'aviazione civile), largamente usato come fonte di direttive sul software dai costruttori che devono ottenere una certificazione delle autorità aeronautiche, rifiuta esplicitamente di stabilire requisiti o metodi quantitativi per la valutazione dell'affidabilità del software. Invece, queste commissioni considerano un corretto approccio ingegneristico - organizzazione rigorosa del progetto, revisioni e collaudi accurati e analisi degli errori precedenti - più critico dell'uso di misure quantitative. Il messaggio di base del documento è che «i progettisti devono usare un approccio disciplinato al software: definizione dei requisiti, progetto, sviluppo, collaudo, controllo della configurazione e documentazione». Cioè, la miglior garanzia di affidabilità è data dalla verifica che al progetto sia stata dedicata la cura più scrupolosa.

Quanto buona è questa garanzia? Si potrebbe argomentare che non è molto buona: non c'è nessuna prova che metodi superiori di progetto e sviluppo producano *costantemente* prodotti di qualità superiore. Non possiamo nemmeno essere sicuri che i metodi migliori esistenti producano mai un'affidabilità sufficiente per le applicazioni più critiche.

Evitare la quantificazione della sicurezza del software è una limitazione grave per molte applicazioni in sistemi potenzialmente pericolosi, specie in quelli per cui è richiesta una valutazione probabilistica di rischio prima che ne sia permesso l'esercizio. Si possono stimare con ragionevole accuratezza le probabilità dei guasti fisici causati da sforzo o usura; ma questa accuratezza non si può avere in una stima della probabilità di



La natura degli errori del software

Il software occasionalmente sbaglia perché contiene difetti di progetto. Qualcuno argomenta che questi errori sono sistematici: poiché scrivere software è un puro esercizio logico, non c'è niente di intrinsecamente incerto nel suo comportamento. Se si sa abbastanza sui dati di ingresso, il comportamento del programma si può considerare deterministico. Noi, tuttavia, crediamo che non si possano trattare matematicamente gli errori del software in termini puramente deterministici. Crediamo che per descrivere la natura degli errori del software sia necessario un approccio probabilistico, esattamente come si usa la statistica per descrivere quanto spesso, in media, si guasta un congegno elettrico o meccanico.

Per vedere il perché, consideriamo tutti i possibili dati di ingresso (parliamo di «spazio degli ingressi») che il software può incontrare durante la sua vita operativa. Un dato di ingresso (o «ingresso») per una operazione del software è un insieme di dati digitali (cioè numeri), ottenuti dal mondo esterno o da informazioni già immagazzinate nella memoria del calcolatore. Nell'illustrazione lo spazio degli ingressi è mostrato con le due dimensioni della pagina stampata, ma in pratica avrebbe normalmente molte dimensioni.

Lo spazio degli ingressi qui raffigurato contiene tre zone corrispondenti a difetti del programma, numerate da 1 a 3. L'ingresso *x* si trova nella zona di un difetto (il numero 2), cioè causerebbe un errore: il programma produrrebbe per questo ingresso un risultato inaccettabile. Invece il programma elaborerebbe senza errori l'ingresso *y*, che non è compreso in nessun difetto.

Un programma si collauda eseguendolo ripetutamente con molti ingressi diversi e controllando se i risultati sono corretti. Se il programma produce un risultato corretto durante il collaudo, lo produrrà poi ogni volta che lo stesso ingresso si ripresenta. Per la maggior parte dei programmi, un collaudo per tutti gli ingressi possibili richiederebbe miliardi di miliardi di anni; di qui la necessità di prevedere la probabilità di un errore basandosi su un campione di ingressi.

Vorremmo sapere quando il programma farà il prossimo errore, ma questo è impossibile a causa dell'incertezza propria del processo. Una prima causa di incertezza è il meccanismo fisico che determina la successione degli ingressi (la «traiettoria» nello spazio degli ingressi). Non possiamo mai sapere con certezza quali ingressi saranno selezionati in futuro, e ingressi diversi avranno probabilità diverse di essere selezionati. In secondo luogo, non conosciamo la grandezza e la posizione dei difetti nello spazio degli ingressi. Anche se conoscessimo la traiettoria, non sapremmo quando essa entrerebbe in un difetto.

Pertanto, dobbiamo descrivere le nostre convinzioni riguardo agli errori futuri di un programma in termini probabilistici. Possiamo per esempio voler determinare la probabilità che il programma sopravviva a un certo numero di ingressi prima di fare un errore. Oppure potremmo richiedere la probabilità che un ingresso scelto a caso provochi un errore. Entrambe le domande si possono tradurre in termini di affidabilità rispetto al tempo, cioè probabilità che il programma possa lavorare senza errori per una certa durata.

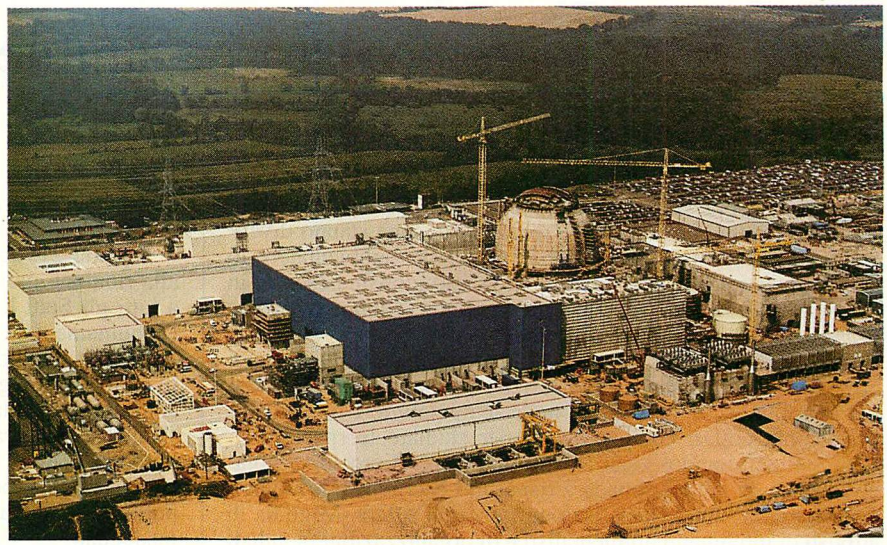
Riassumendo: siamo costretti a considerare il processo dei successivi errori di un programma come qualcosa di altrettanto «casuale» dei guasti di un congegno fisico; quindi è inevitabile usare misure di affidabilità di tipo probabilistico.

avarie o incidenti nell'intero sistema (incluso il software), se tutto ciò che si può dire riguardo al software è che si è fatto il possibile per evitare errori. Richiedere l'uso dei migliori metodi correnti non risolve il problema. Ci affrettiamo ad aggiungere che sarebbe folle abbandonare quelle tecniche che certamente migliorano l'affidabilità e la sicurezza solo perché non si sa in che misura esattamente queste tecniche siano di aiuto. Le norme che incoraggiano il loro uso sono certamente utili, ma non risolvono il problema di sapere se un certo prodotto software offra la sicurezza richiesta.

Il secondo approccio - a nostro avviso preferibile - è quello di progettare i sistemi in modo che il ruolo del software non sia troppo critico. Qui, «non troppo critico» vuol dire che la affidabilità richiesta al software deve essere abbastanza modesta da poter essere dimostrata prima di mettere in funzione il sistema. Questo approccio è stato seguito per il nuovo reattore nucleare Sizewell B in Gran Bretagna, dove il requisito per il sistema di protezione a software è solo una probabilità di errore minore di 10^{-4} per richiesta di intervento.

Ci sono metodi consolidati per limitare la criticità di un qualunque componente di un sistema. Per esempio, un impianto industriale controllato da calcolatori può essere dotato di sistemi di sicurezza che non usano software o altri componenti complessi. I sistemi di sicurezza e di riserva di solito eseguono funzioni più semplici dei sistemi principali di controllo, così che possono essere costruiti in maniera più affidabile. Per maggior prudenza, i sistemi di sicurezza e di riserva sono tenuti del tutto separati da quelli principali: possono esser costruiti con tecnologie differenti e usare sensori, attuatori e alimentazione separati. Allora, la probabilità che il sistema primario e quello di riserva o di sicurezza siano in avaria simultaneamente si può ragionevolmente considerare bassa.

Il terzo approccio consiste semplicemente nel prendere atto dei limiti attuali del software e accettare una minore sicurezza globale dei sistemi. Dopo tutto, la nostra società esige a volte altissimi livelli di sicurezza per motivi che possono essere irrazionali. I sistemi medici sono un buon esempio. È noto che i chirurghi hanno insuccessi relativamente frequenti, e sembrerebbe naturale accettare un'alternativa computerizzata se essa si dimostrasse almeno altrettanto affidabile del chirurgo umano. In effetti è probabile che presto avremo chirurghi robot capaci di eseguire operazioni impossibili per esseri umani.



La complessità del software (oltre 100 000 righe di codice su centinaia di processori) può rendere arduo provare, per alcuni critici, la sicurezza del reattore nucleare britannico Sizewell B, il primo con sistemi di emergenza convenzionali e a software.

Questi tre approcci alla regolamentazione della sicurezza del software possono apparire deludenti. Ciascuno pone limiti o al grado di sicurezza nel sistema, o alla complessità del programma. Forse l'unico modo per imparare di più sui compromessi necessari fra sicurezza e complessità è studiare gli errori (o l'assenza di errori) del software durante il suo uso effettivo.

Sfortunatamente, i dati da cui dedurre predizioni statistiche sono scarsi. Di rado le industrie divulgano informazioni sugli errori del software. Temono sia i possibili vantaggi per i concorrenti, sia, soprattutto, le reazioni negative dell'opinione pubblica, che potrebbe vedere la scoperta di un difetto del software come un'indicazione di bassi standard di produzione, quando in effetti essa potrebbe indicare una procedura di collaudo molto seria applicata a software di ottima qualità. Ma la segretezza può solo indurre ad attendersi livelli di sicurezza sempre meno realistici. Alcuni suggeriscono che per i prodotti software usati in ruoli critici sia obbligatorio registrare e divulgare i dati sugli errori avvenuti: questo eliminerebbe il rischio che le industrie più aperte nel condividere queste informazioni si trovino svantaggiate.

Comunque ottenuta, una ampia raccolta di dati aiuterebbe, col tempo, a quantificare l'efficacia delle diverse tecniche di produzione e di valutazione. Le informazioni aiuterebbero a stabilire regole più realistiche per valutare l'affidabilità dei sistemi software. Così, per software che non può essere collaudato statisticamente fino al livello richiesto, potrebbero essere stabiliti limiti, dipendenti dalla complessità del programma, per il livello di sicurezza che è accettabile dichiarare. Questo approccio potrebbe rendere possibile giustificare dichiarazioni di livelli di affidabilità maggiori di quelli che sono credibili adesso.

Intanto, dovremmo restar diffidenti nei confronti di ogni dichiarazione di affidabilità altissima. Considerato il livello di complessità possibile con la tecnologia software, crediamo che lo scetticismo sia l'atteggiamento più prudente.

(Da «Le Scienze» n. 293, gennaio 1993.)

BEV LITTLEWOOD *dirige il Centre for Software Reliability della City University di Londra.*

LORENZO STRIGINI *è ricercatore all'Istituto di elaborazione delle informazioni del CNR.*

calcolatori e ambiente

Calcolatori più veloci ed economici, programmi migliori e una rete internazionale in rapida espansione stanno diventando strumenti straordinari per la protezione ambientale e lo sviluppo sostenibile, in accordo con la rete globale descritta in un nuovo studio del Worldwatch Institute (*Global Network: Computer in a Sustainable Society*).

Con i calcolatori si possono sviluppare modelli relativi agli effetti dell'inquinamento atmosferico sul clima globale, così come controllare i cambiamenti nella temperatura. I biologi utilizzano ora collari computerizzati per studiare le specie a rischio, «monitorando» ogni loro movimento. Microchip regolano le funzioni delle lampade a risparmio energetico, i mulini a vento progrediti e le installazioni a energia solare. Migliaia di attivisti di movimenti ambientalisti e di organizzazioni mondiali utilizzano reti di calcolatori per scambiarsi notizie e coordinare le loro campagne promozionali.

Anche per la computerizzazione ci sono comunque costi ambientali da pagare. «Travolti dalla nostra visione delle potenzialità dei calcolatori, - scrive John E. Young - abbiamo fallito nell'affrontarne l'impatto e l'influenza. Poche persone si rendono conto che la Silicon Valley, luogo di nascita dell'industria del calcolatore, è anche la terra della maggior concentrazione di siti ad alto rischio negli Stati Uniti. O che i calcolatori usano ogni anno tutta l'elettricità dell'intero Brasile.»

Inoltre, per i calcolatori che devono esercitare il loro potenziale per promuovere la protezione ambientale, i resoconti sottolineano la necessità di una maggiore attenzione nel garantire il pubblico accesso all'informatica computerizzata.

Utilizzando modelli al calcolatore, attualmente è possibile identificare alcuni problemi ambientali prima che questi diventino schiaccianti. Per esempio, gli scienziati avevano teorizzato dal 1896 che maggiori emissioni di biossido di carbonio avrebbero potuto causare un riscaldamento globale, ma solo dai primi anni ottanta di questo secolo - quando la potenza dei calcolatori permise di mettere a punto modelli delle complessità atmosferiche - le simulazioni climatiche iniziarono a valutare in modo affidabile tali effetti.

Nella Columbia Britannica il «Club Sierra» del Canada occidentale usa i calcolatori per approntare mappe dettagliate del manto forestale dell'Isola Vancouver. Il sistema ha rilevato che solo il 23 per cento dell'originaria foresta temperata tipica delle basse altitudini - un ecosistema sempre più a rischio - è ancora integro, mentre l'82 per cento del territorio complessivo è adibito a piantagione e taglio. Questa informazione si è rivelata essenziale per ottenere provvedimenti governativi di protezione delle antiche foreste dell'isola.

I calcolatori, collegati da reti di telecomunicazione, sono diventati rapidamente importanti mezzi di comunicazione per ambientalisti, ricercatori e attivisti. Il più grande raggruppamento di reti di calcolatori, Internet, serve già 11 milioni di utenti; si ipotizza che le trasmissioni raddoppino ogni cinque mesi.

Le 11 reti interconnesse dell'Association for Progressive Communication (APC) formano il maggior complesso mondiale di informazioni ambientali in linea e di attivisti. Le reti APC - che comprendono Econet/Peacenet negli Stati Uniti - collegano più di 17 000 attivisti in 94 paesi. Le conferenze dell'APC trasmettono informazioni che sono dettagliate, globali e a tutt'oggi sbalorditive. Recentemente, per esempio, un APC posizionato in una foresta ha riportato l'omicidio degli indiani Yanomami in un angolo sperduto dell'Amazzonia alcuni giorni prima dei maggiori quotidiani degli Stati Uniti.

La rete di calcolatori per il «diritto a conoscere» (Rete RTK), che ha sede centrale a Washington, D.C., offre liberamente accesso all'inventario delle discariche tossiche (TRI) del Governo degli Stati Uniti. Il *data base* TRI procura le informazioni sulle discariche industriali di prodotti chimici per circa 24 000 servizi industriali. Gruppi verdi nel mondo hanno usato le informazioni fornite da TRI per produrre dozzine di relazioni sull'inquinamento, attirando l'attenzione pubblica e stimolando sforzi industriali in molti stati.

Agenda 21, accettata da tutti i membri delle Nazioni Unite alla riunione mondiale del 1992 a Rio de Janeiro, raccomanda a tutti gli Stati la realizzazione di un sistema di controllo dell'inquinamento.

Le reti maggiormente diffuse negli Stati Uniti, in Europa e in Giappone raggiungono anche molti paesi in via di sviluppo, come i nuovi Stati democratici dell'Europa dell'Est e la ex-Unione Sovietica. Sofisticati programmi di comunicazione che possono operare su calcolatori non costosi sono strumenti di comunicazione per aree remote con il resto del mondo, di importanza tale da mettere talvolta in crisi sistemi telefonici inadeguati.

Global Network sottolinea con enfasi che gli indirizzi di politica industriale dei produttori di calcolatori devono contribuire a evitare l'inquinamento globale. Negli Stati Uniti ci sono attualmente 23 siti a rischio (erano 29) nella Silicon Valley, la maggior parte dei quali dovuti al passaggio nelle falde acquifere sotterranee di sostanze pericolose utilizzate nella produzione di apparecchiature elettroniche. Molte di queste sostanze possono causare gravi problemi alla salute dell'uomo.

Lo studio del Worldwatch Institute raccomanda che i Governi e i costruttori di calcolatori aumentino i loro sforzi per riprogettare i calcolatori e i processi produttivi in modo da risolvere i problemi ambientali.

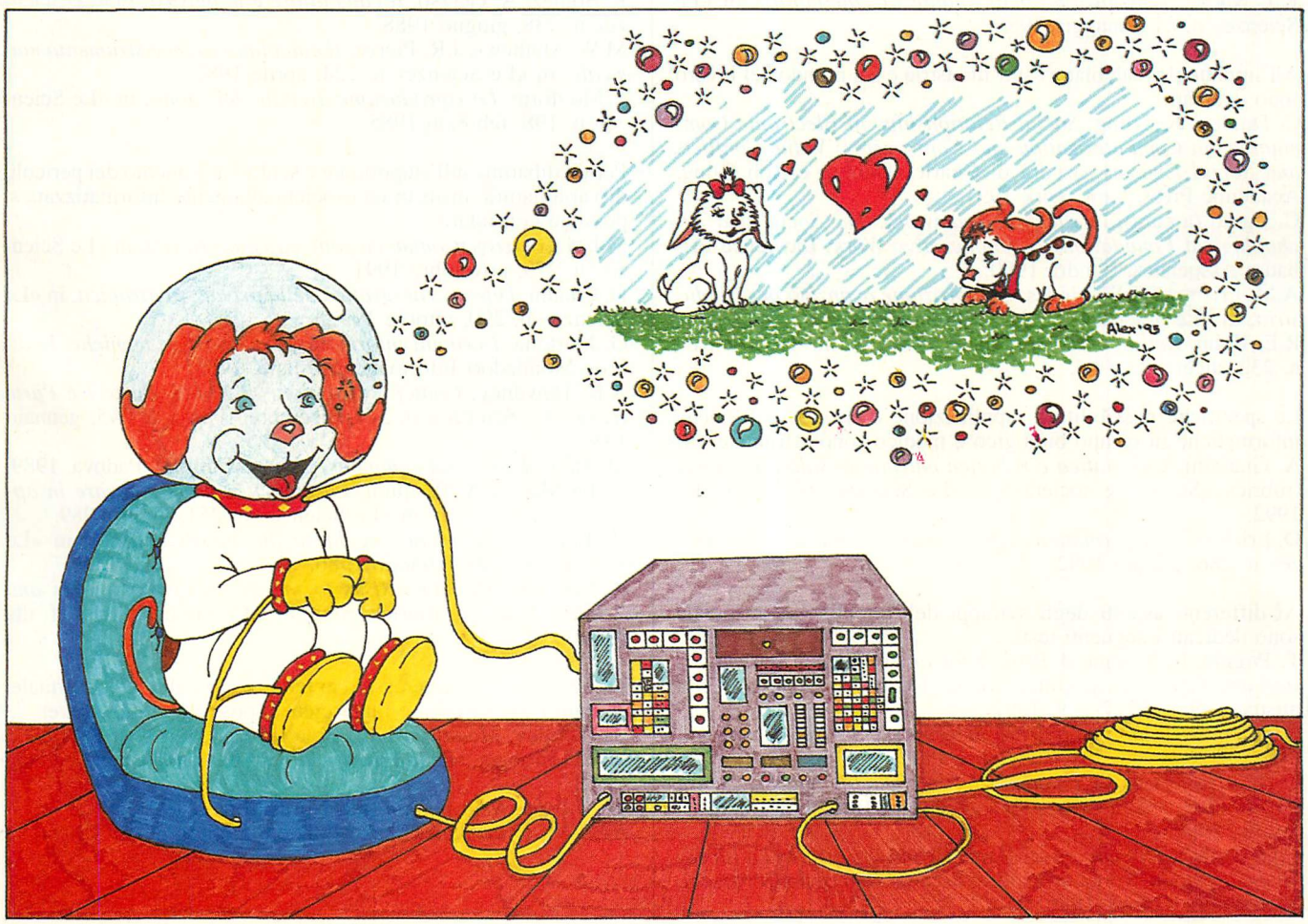
Uno di questi progetti, il programma *Energy Star Computer* dell'Agenzia per la protezione ambientale (EPA) promette già grandi benefici. Esso raccomanda l'uso di un particolare logo per le aziende i cui calcolatori, componenti o stampanti si attengano a certi standard di risparmio di energia. Circa 150 produttori hanno già aderito all'iniziativa. EPA ritiene che se i prodotti di *Energy Star* conquisteranno due terzi del mercato entro l'anno 2000, il loro uso potrà prevenire emissioni di biossido di carbonio pari a quelle prodotte annualmente da cinque milioni di automobili.

Global Network avverte che i calcolatori non risolveranno i problemi mondiali, ma aiuteranno le persone a «pensare in termini globali», come raccomandava René Dubos. Se applicati propriamente, suggerisce Young, «i calcolatori possono fornire occhi e orecchie in un'epoca in cui le nostre azioni hanno spesso influenze universali.»

«Rendendoli facili da usare e accessibili a tutti - conclude Young - i calcolatori e le reti possono costituire una forza per ridurre le conseguenze ambientali negative della civiltà industriale, eliminare la povertà e consolidare la democrazia.»

pagina *virtuale* ✓ di realtà virtuale

«Le nostre esperienze quotidiane si svolgono in larghissima misura in una realtà costruita da noi stessi» è da questa constatazione che, negli anni settanta, è partito M. W. Krueger nella sua ricerca di una forma d'arte interattiva. Krueger voleva creare ambienti in grado di «rispondere» alle azioni di chi vi entrasse. All'inizio questi erano costituiti da una serie di luci e di suoni che mutavano a seconda delle azioni dei presenti, ma progressivamente, con l'aiuto del calcolatore, nacque l'idea di un controllo sempre più sofisticato dei rapporti fra ambiente e partecipante. Fino a concepire l'idea di un mondo grafico creato dal calcolatore a cui partecipare con l'intero corpo. Queste ricerche si saldarono con quelle che I. Sutherland, il «padre» della computer graphics, su un visore a casco, in grado di creare immagini stereoscopiche tridimensionali, e con quelle della VPL Research Inc. sul *DataGlove*, un «guanto» in grado di sentire posizione e movimenti della mano e di restituire a chi le indossa sensazioni create dal calcolatore. Nel 1984, infine, lo scrittore W. Gibson creò nel suo romanzo *Neuromante* il termine *ciberspazio* per indicare un'unica realtà artificiale che potesse essere esperita contemporaneamente da più persone. Le idee, o meglio, le suggestioni ispirate da queste nuove possibilità tecnologiche hanno in breve raggiunto ampia diffusione e popolarità, anche perché il nucleo dei loro più accesi sostenitori è costituito da una singolare associazione di «maghi», visionari e artisti del computer, fra i quali ha preso posto anche il profeta dell'«espansione della coscienza», Timothy Leary. A fianco, è mostrata un'opera di Luca Cambiaso (1527-1585), *Figure in combattimento*, conservata alla Galleria degli Uffizi di Firenze, al cui titolo - considerata la modernità del gusto grafico - potrebbe aggiungersi la postilla «nel ciberspazio». Sotto, Moon Meo, di cui si parla nella Presentazione, mentre sperimenta la macchina per la realtà virtuale canina.



letture consigliate

Nella vasta letteratura dedicata ai problemi affrontati nel quaderno segnaliamo in via preferenziale articoli apparsi su «Le Scienze» sia per l'interesse degli stessi, sia perché riteniamo che ciò consenta di seguirne più dappresso l'articolata strutturazione. Per approfondire i temi relativi all'elaborazione e alla trasmissione dati rimandiamo a:

A. Penzias, *Ideas and Information: Managing in a High-Tech World*, W.W. Norton & Company, 1989.
M. Schrage, *Shared Minds: The New Technologies of Collaboration*, Random House, New York 1990.
A. Peled, *La prossima rivoluzione informatica*, in «Le Scienze» n. 232, dicembre 1987.
D. Gelernter, *Programmazione ed elaborazione avanzata*, in «Le Scienze» n. 232, dicembre 1987.
M.H. Kryder, *Immagazzinamento dei dati per l'elaborazione avanzata*, in «Le Scienze» n. 232, dicembre 1987.
W.D. Hillis, *La Connection Machine*, in «Le Scienze» n. 228, agosto 1987.

Per il capitolo relativo alla scienza e all'istruzione si possono vedere:

J.E. Young, *Global Network. Computer in a Sustainable Society*, Worldwatch Institute, Washington, D.C. 1993.
A.C. Kay, *Calcolatori, reti e istruzione*, in «Le Scienze» n. 279, novembre 1991.
D. Mundici (a cura), *La scienza dei calcolatori*, quaderno di «Le Scienze» n. 56, ottobre 1990.
P. Hut, G.J. Sussman, *Elaborazione avanzata per la scienza*, in «Le Scienze» n. 232, dicembre 1987.
K.J. Niklas, *L'evoluzione delle piante al calcolatore*, in «Le Scienze» n. 213, maggio 1986.

All'impatto dei calcolatori sull'industria e sul mondo del lavoro sono dedicati:

C. Dunlop, R. Kling, *Social Relationships in Electronic Communities* in *Computerization and Controversy: Value Conflicts and Social Choices*, a cura di Charles Dunlop e Rob Kling, Academic Press, New York 1991.
C. Egido (a cura), *Intellectual Teamwork: The Social and Technological Foundations of Cooperative Work*, Lawrence Erlbaum Associates, Londra 1990.
A.M. Erisman, K.W. Neves, *Elaborazione avanzata per l'industria*, in «Le Scienze» n. 232, dicembre 1987.
R.E. Kahn, *Reti per l'elaborazione avanzata*, in «Le Scienze» n. 232, dicembre 1987.

Le specifiche possibilità di applicazione delle nuove tecniche informatiche in campo biologico e medico sono affrontate in:

A. Giannini, *Eidomatica e robotica entrano in sala operatoria* (rubrica «Scienza e società») in «Le Scienze» n. 287, luglio 1992.
D. Erickson, *L'informatica del Progetto genoma*, in «Le Scienze» n. 286, giugno 1992.

Ai differenti aspetti degli sviluppi dell'intelligenza artificiale sono dedicati i seguenti testi:

T. Poggio, L. Stringa, *A Project for an Intelligent System: Vision and Learning*, in «International Journal of Quantum Chemistry», 42, pp. 727-739, 1992.
G.E. Hinton, *L'apprendimento delle reti artificiali di neuroni*, in «Le Scienze» n. 291, novembre 1992.
L. Stringa, *Macchine e comportamento intelligente*, in *Capire l'artificiale*, a cura di Massimo Negrotti, Bollati Boringhieri, Torino, 1990.
A.M. Turing, *Macchine calcolatrici e intelligenza* in *La filosofia degli automi*, a cura di Vittorio Somenzi e Renato Cordeschi, Boringhieri, Torino, 1986.
D.B. Lenat, *Software per i sistemi intelligenti*, in «Le Scienze» n. 195, novembre 1984.
S. Sandri, *La sintesi automatica della lingua italiana*, in «Le Scienze» n. 199, marzo 1985.
R. Pieraccini, *Macchine che comprendono la voce*, in «Le Scienze» in «Le Scienze» n. 201, maggio 1985.

Feng-hsiung Hsu, *Large Scale Parallelization of Alpha-Beta Search: An Algorithmic and Architectural Study with Computer Chess*, Carnegie-Mellon University Computer Science Department, CMU-CS-90-108, febbraio 1990.
A.L. Zobrist, F.R. Carlson, Jr., *Il calcolatore a lezione di scacchi*, in «Le Scienze» n. 62, ottobre 1973.

Una selezione di opere sull'ampia congerie di ulteriori applicazioni del calcolatore è poi la seguente:

G. Sticks, *Automazione del volo: quale ruolo per il pilota?*, in «Le Scienze» n. 277, settembre 1991.
R. McIvor, *Le carte intelligenti*, in «Le Scienze» n. 209, gennaio 1986.

W.M. Newman, R.F. Sproull, *Principi di computer graphics*, McGraw-Hill, Milano, 1987.
A. van Dam, *Sofrware per la grafica*, in «Le Scienze» n. 195, novembre 1984.
J.D. Foley, A. van Dam, *Fundamentals of Interactive Computer Graphics*, Addison-Wesley, Londra 1982.

P. Boulez, A. Gerzso, *Il calcolatore e la musica*, in «Le Scienze» n. 238, giugno 1988.
M.W. Mathews, J.R. Pierce, *Il calcolatore come strumento musicale*, in «Le Scienze» n. 224, aprile 1987.
J. Monforte, *La riproduzione digitale del suono*, in «Le Scienze» n. 198, febbraio 1985.

Per un dibattito sull'importante e sentito argomento dei pericoli, di varia natura, insiti in una società altamente informatizzata si possono consultare:

M.L. Dertouzos, *Comunicazioni, calcolatori, reti*, in «Le Scienze» n. 279, novembre 1991.
D. Chaum, *Difesa crittografica della privacy elettronica*, in «Le Scienze» n. 290, ottobre 1992.
G. Martella, *I crimini informatici. La storia, le tecniche, le difese*, Mondadori Informatica, Milano, 1990.
A.K. Dewdney, *Codici e violazioni di codici. Parte I e Parte II*, in «Le Scienze» n. 244, dicembre 1988 e n. 245, gennaio 1989.
M. Salin, *I virus dei computer*, Liviana Editrice, Padova, 1989.
G. Di Marco, A. Pasquini, *La correttezza del software in applicazioni a rischio*, in «Le Scienze» n. 251, luglio 1989.
H. Lin *Il software per la difesa antimissili balistici*, in «Le Scienze» n. 210, febbraio 1986.
P. Neumann (a cura), *Risks to the Public in Computers and Related Systems*, rubrica fissa in «Communications of the ACM».

Infine, per chi sia interessato ai temi relativi alla realtà virtuale, ai confini fra scienza e fantascienza, possiamo consigliare:

B. Woolley, *Mondi virtuali*, Bolati Boringhieri, Torino 1993.
M.W. Krueger, *Realtà artificiale*, Addison-Wesley, Milano 1992.
W. Gibson, *Neuromante*, Ed. Nord, Milano 1991.
AA.VV., *Cyberpunk*, Shake Edizioni Underground, Milano.

In questo numero:

Tecnologie e reti informatiche degli anni novanta di L.G. Tesler
I calcolatori del XXI secolo di M. Weiser
La meccanizzazione di progettazione e produzione di T.G. Gunn
Calcolatori e reti in azienda di T.W. Malone e J.F. Rockart
Elaborazione avanzata per la medicina di G.D. Rennels ed E.H. Shortliffe
I teleoperatori di W.R. Uttal
I calcolatori e l'architettura di D.P. Greenberg
Il calcolatore Grande Maestro di scacchi di Feng-hsiung Hsu, T. Anantharaman, M. Campbell e A. Nowatzyk
Il progetto MAIA di L. Stringa
Dal braccio industriale al robot mobile di V. Tagliasco
Calcolatori, reti e lavoro di L. Sproull e S. Kiesler
Libertà e sicurezza nell'era dell'informatica di G.O. Longo
I rischi del software di L. Strigini e B. Littlewood

Prossimo quaderno:

IL TEMPO DEI DINOSAURI a cura di G. Ligabue

Un periodico LE SCIENZE S.p.A. piazza della Repubblica, 8 - 20121 Milano